



**Aalto-yliopisto
Kemian tekniikan
korkeakoulu**

Kari Vähä-Ojala

Puu-muovikomposiittimateriaalin ominaisuuksien kartoitus ja optimoiminen

Master's Programme in Chemical, Biochemical and Materials Engineering
Major: Fiber and Polymer Engineering

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin
tutkintoa varten Espoossa 31.10.2019

Valvoja Professori Jouni Paltakari

Ohjaaja Diplomi-insinööri Robert Holmberg

Tekijä Kari Vähä-Ojala

Työn nimi Puu-muovikomposiittimateriaalin ominaisuuksien kartoitus ja optimoiminen

Koulutusohjelma Master's Programme in Chemical, Biochemical and Materials Engineering

Pääaine Fibre and Polymer Engineering

Työn valvoja Professori Jouni Paltakari

Työn ohjaaja(t)/Työn tarkastaja(t) DI Robert Holmberg

Päivämäärä 31.10.2019

Sivumäärä 52

Kieli suomi

Tiivistelmä

Tämän diplomityön tavoitteena oli määrittää Woodion puu-muovikomposiitin lujuusominaisuuksia, kehittää komposiitin rakenteesta tasaisempaa ja tutkia alumiinitrihydroksidin vaikutusta lujuusominaisuuksiin. Lujuusominaisuuksia tutkittiin taivutus-, veto- ja iskulujuuskokeilla. Komposiitin rakenteen tasaisuutta pyrittiin parantamaan pienemmällä lujitteen partikkelikoolla sekä hyödyntämällä vakuumia komposiitin valmistuksessa.

Komposiitille saatiin määritettyä kimmokerroin, murtovetolujuus, murtovenymä ja iskulujuus. Lujitteen partikkelikokoa pienentämällä ja vakuumia hyödyntämällä saatiin vähennettyä merkittävästi komposiitissa esiintyviä tyhjiä huokosia. Alumiinitrihydroksidin lisääminen kasvatti komposiitin kimmokerrointa, murtovetolujuutta ja iskulujuutta, mutta teki komposiitin rakenteesta epätasaisempaa.

Avainsanat partikkeli vahvisteinen komposiitti, puu-muovikomposiitti, Woodio



Author Kari Vähä-Ojala

Title of thesis Determination and optimization of Wood-plastic composite

Degree Programme Master's Programme in Chemical, Biochemical and Materials Engineering

Major Fibre and Polymer Engineering

Thesis supervisor Professor Jouni Paltakari

Thesis advisor(s) / Thesis examiner(s) M.Sc. (Tech.) Robert Holmberg

Date 31.10.2019

Number of pages 52

Language Finnish

Abstract

The main goal of this thesis was to determine strength properties of Woodio wood-plastic composite. Other goals were to develop the structure of the composite more uniform and study the effect of aluminium hydroxide to the strength properties of the composite. The strength properties were determined by bending strength test, tensile strength test and impact strength test. The uniformity of the composite was modified with smaller particle size of the reinforcement and utilizing vacuum during the production of the composite.

In this thesis Young's modulus, ultimate tensile strength, ultimate tensile strain and impact strength results were obtained for the composite. The smaller particle size of reinforcement and vacuum increased the uniformity. Aluminium hydroxide increased the Young's modulus, ultimate tensile strength and impact strength but made the structure of the composite less uniform.

Keywords particle reinforced composite, wood-plastic composite, Woodio

Alkusanat

Diplomityön aikana olen kohdannut monia ongelmia, oivalluksia ja onneksi välillä onnistumisiakin. Haluan kiittää Woodiota tästä diplomityömahdollisuudesta, kärsivällisyydestä ja tuesta. Tahdon kiittää myös valvojaani professori Jouni Paltakaria, Henri Ryönänkoskea suuresta avusta Woodion laboratoriossa ja Timo Kotilahtea avusta Biotuotteiden ja biotekniikan laitoksella. On ollut hienoa olla mukana tutkimassa ja kehittämässä uutta innovatiivista komposiittimateriaalia.

Helsingissä 26.10.2019

Kari Vähä-Ojala

Sisällysluettelo

Luettelo symboleista ja lyhenteistä	v
1 Johdanto	1
KIRJALLISUUSOSA.....	3
2 Yleiskatsaus komposiitteihin	3
2.1 Komposiittien määritelmiä.....	3
2.2 Partikkelivahvisteiset komposiitit	6
2.3 Kuituvahvisteiset komposiitit.....	6
2.4 Komposiiteissa hyödynnettävät matriisimateriaalit	9
2.5 Puu-muovikomposiitit ja niiden käyttökohteet	11
3 Komposiitin hajoaminen.....	14
3.1 Komponenttien tehtävät.....	14
3.2 Voiman siirtyminen partikkeli- ja kuituvahvisteisissa komposiiteissa	15
3.3 Komposiitin hajoaminen	16
3.4 Puu-muovikomposiitin valmistuksen ja käytön rajoitteita	19
4 Puu-muovikomposiitin käyttö kylpyhuonekalusteissa.....	21
4.1 Kylpyhuonekalustemateriaalit	21
4.2 Raaka-aineiden vertailu	22
4.3 Valmistusmenetelmien ekologisuuden vertailu	23
4.4 Loppukäyttömahdollisuuksien vertailu.....	23
KOKEELLINEN OSA.....	25
5 Materiaalit ja menetelmät	25
5.1 Testimateriaalin valmistus	25
5.1.1 Valmistus alkuperäisellä reseptillä	26
5.1.2 Valmistus pienemmällä hakkeella	28
5.1.3 Palosuojatun komposiitin valmistus	28

5.1.4	Valmistus vakumoidulla muotilla.....	28
5.2	Taivutuslujuuden testaus	29
5.3	Vetolujuuden testaus	30
5.4	Iskulujuuden testaus	32
6	Tulokset ja tulosten tarkastelu	35
6.1	Valmistusmenetelmien toimivuus	35
6.1.1	Komposiittilevyjen koon ja rakenteiden vaihtelu	37
6.1.2	Komposiittilevyjen puuhakeisuus.....	39
6.2	Taivutuslujuus	40
6.3	Vetolujuus	41
6.4	Iskulujuus.....	43
7	Johtopäätökset	45
8	Lainatut lähteet	49

Luettelo symboleista ja lyhenteistä

σ_m	tehollinen jännitys
σ_0	vaikuttava jännitys
ρ_t	halkeaman kärjen säde
a	halkeaman pituuden puolikas
E	kimmokerroin
σ	jännitys
ε	venymä

1 Johdanto

Yhteiskunnassa on paine kehittää materiaaleja. Ympäristötietouden kasvaessa materiaaleilta on alettu vaatia keveyttä, energiatehokkuutta, ympäristöystävällisyyttä ja uusiutuvuutta. Hyvällä suunnittelulla on onneksi mahdollista valmistaa materiaaleja räätälöidyillä ominaisuuksilla. Yhdistelemällä monoliittisia materiaaleja komposiiteiksi voidaan parhaassa tapauksessa sisällyttää näiden materiaalin edulliset ominaisuudet yhteen komposiittiin. Komposiitteja on valmistettu jo pitkään, ja niitä hyödynnetään niin halpoina rakennusmateriaaleina kuin vaativissa avaruustekniikan sovelluksissa. (Callister & Rethwisch, 2015; Douglas, et al., 2014)

Woodio valmistaa puu-muovikomposiittia, jota hyödynnetään kylpyhuoneiden käsienpesualtaissa. Komposiitissa yhdistyy puun edustava ulkonäkö, keveys ja ekologisuus sekä muovin vedenkestävyys ja prosessoitavuus. Tämän diplomityön tarkoitus oli kartoittaa Woodion komposiitin lujuusominaisuuksia sekä kehittää komposiitista tasaisempaa, virheettömämpää ja helpommin hyödynnettävää myös muihinkin sovelluksiin kuin käsienpesualtaisiin.

Tässä diplomityössä Woodion komposiitin ominaisuuksia pyrittiin parantamaan puun pienemmällä raekoolla, vakuumitekniikalla sekä alumiinitrihydroksidilla (ATH). Komposiitin lujuusominaisuuksia tutkittiin taivutus-, veto- ja iskulujuuskokeilla ja komposiitin huokoisuutta ja tasaisuutta arvioitiin silmämääräisesti.

Tutkimuksen ennako-oletus on, että pienempi raekoko johtaa komposiitin tasaisempaan rakenteeseen ja vakuumitekniikan hyödyntäminen vähentää komposiitissa ilmeneviä huokosia, joita syntyy valmistuksessa. Tasaisempi ja huokosvapaa rakenne johtaa oletettavasti parempiin lujuusarvoihin, koska materiaalissa on vähemmän jännityksen keskittäjiä. ATH:n lisääminen heikentää oletettavasti materiaalin prosessoituvuutta ja tasaisuutta sekä lujuusominaisuuksia,

mutta palonesto-ominaisuuksien paranemisen ansiosta parantaa materiaalin käytettävyyttä muihin sovelluksiin.

KIRJALLISUUSOSA

2 Yleiskatsaus komposiitteihin

Tämä luku antaa yleisen katsauksen komposiitteihin. Alaluvussa 2.1 käsitellään komposiittien määritelmä, jaottelu ja lyhyesti rakenne. Alaluvussa 2.2 esitellään partikkelivahvisteisten komposiittien yleisimpiä ominaisuuksia ja alaluvussa 2.3 yleisimpiä kuituvahvisteisia komposiitteja. Alaluvussa 2.4 käsitellään yleisimmät matriisimateriaalit ja lopuksi alaluvussa 2.5 kuvaillaan puu-muovikomposiittien tyypillisiä ominaisuuksia ja käyttökohteita.

2.1 Komposiittien määritelmiä

Komposiitti on yhdistelmä kahdesta tai useammasta eri materiaalista. Materiaaleja, joista komposiitti koostuu, kutsutaan komponenteiksi. Komponentit eroavat toisistaan fysikaalisesti ja/tai kemiallisesti ja komponenttien välillä on selkeä rajapinta. (Callister & Rethwisch, 2015; Chawla, 1987; Douglas, et al., 2014)

Komposiitit eivät ole materiaaliryhmänä uusi. Luonto on täynnä esimerkkejä komposiittirakenteista. Puuaines on selluloosakuiduista, hemiselluloosasta ja ligniinistä koostuva luonnonpolymeerikomposiitti, jossa taipuisat ja korkean vetolujuuden omaavat selluloosaketjut ovat sidottuina yhteen hemiselluloosalla ja ligniinillä. Luut taas muodostuvat pehmeistä ja lyhyistä kollageenikuiduista, jotka ovat sidottuna mineraaliseokseen. (Callister & Rethwisch, 2015; Chawla, 1987; Gay & Hoa, 2007; Mazumbar, 2002; Kaushik & Jin, 2010)

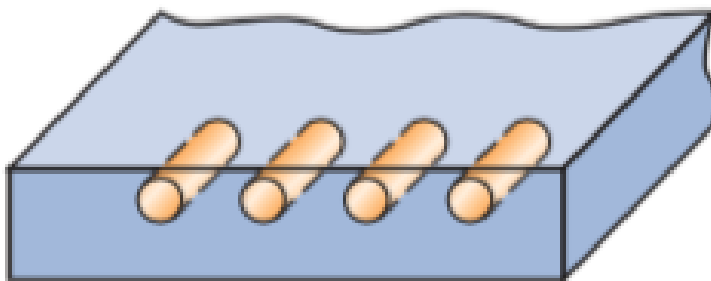
Myös ihminen on valmistanut komposiitteja pitkään. Esimerkiksi jo antiikin ajalla on valmistettu komposiittirakennusmateriaaleja puusta, oljesta ja mudasta. Teollisuuteen kiinnostus komposiitteihin levisi kuitenkin vasta 1960-luvulla. Siitä alkaen komposiitit ovat olleet yleisesti hyödynnettyjä ihmisen valmistamia materiaaleja monissa sovelluksissa. Komposiittien yleistymistä on vauhdittanut

erityisesti keveiden materiaalien tarve. Esimerkiksi korvaamalla teräs komposiitilla voidaan saavuttaa 60–80 m-% säästö tarvittavan materiaalin painossa. (Chawla, 1987; Gay & Hoa, 2007; Mazumbar, 2002)

Komposiitteja luokitellaan useista eri näkökulmista. Ne voidaan jakaa mm. luonnollisiin sekä synteettisiin komposiitteihin. Synteettisiä komposiitteja ovat esimerkiksi muovit, jotka valmistetaan kemiallisen synteessin avulla. Sen sijaan puu on luonnossa esiintyvä komposiitti. (Douglas, et al., 2014)

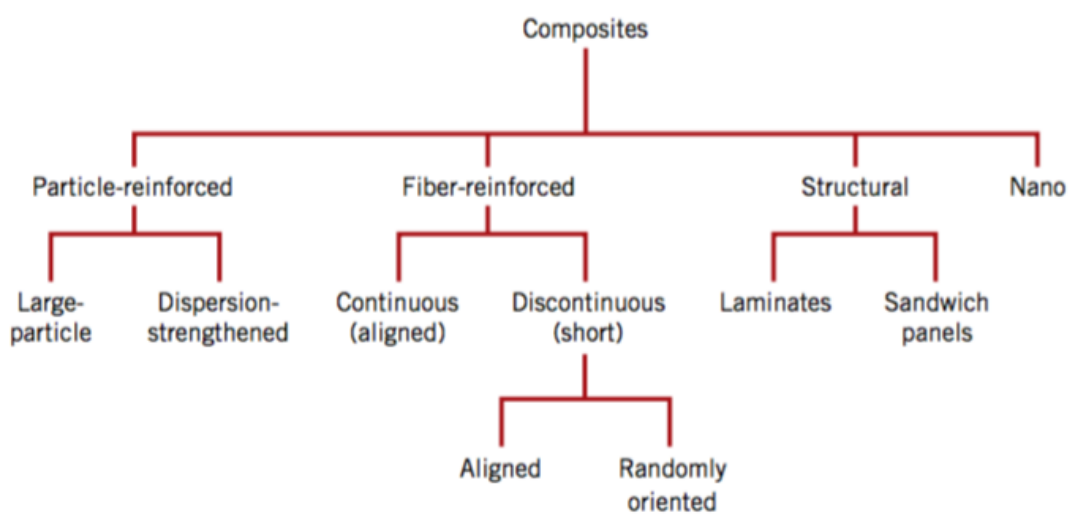
Toinen samantapainen jaottelutapa on jakaa komposiitit perinteisiin ja synteettisiin komposiitteihin. Perinteisiin kuuluvat vähän jalostusta vaativat materiaalit, kuten puu tai portlandsementin ja hiekan sekoitus. Synteettiset komposiitit, kuten hiilikuituvahvisteinen muovi, taas vaativat monimutkaisemman valmistusprosessin. (Douglas, et al., 2014)

Suurin osa synteettisistä komposiiteista koostuu kahdesta pääkomponentista. Toinen komponenteista on yhtenäinen ja sitä nimitetään matriisiksi. Matriisi ympäröi toista komponenttia, jota kutsutaan lujitteeksi (Kuva 1). Lujite voi olla matriisin seassa eri muodoissa. Käytettyjä muotoja ovat esimerkiksi irralliset hiutaleet, partikkelit, kuidut, kuitukiteet tai nanopartikkelit. (Agarwal, 1990; Douglas, et al., 2014; Mazumbar, 2002)



Kuva 1. Komposiitin kaksi komponenttia, harmaa matriisi ja oranssi lujite (Callister & Rethwisch, 2015).

Kolmas yleinen tapa jaotella komposiitteja onkin juuri lujitteen muodon perusteella. Callister & Rethwisch (2015) jakavat komposiitit lujitteen muodon perusteella neljään pääryhmään: partikkelivahvisteisiin, kuituvahvisteisiin, rakenteellisiin ja nanokomposiitteihin (Kuva 2).



Kuva 2. Komposiittien jaottelu lujitteen muodon perusteella (Callister & Rethwisch, 2015).

Partikkelivahvisteisissa komposiiteissa lujitteen kaikki dimensiot ovat suurin piirtein yhtä suuret. Tällainen lujite voi olla muodoltaan esimerkiksi pallomainen tai kuutiomainen. Kuituvahvisteisissa komposiiteissa lujite on muodoltaan kuitumainen eli lujitekappaleet ovat pitkiä ja kapeita. Rakenteellisissa komposiiteissa lujite on orientoitu selkeäksi rakenteeksi esimerkiksi kerroksittaisiksi verkoiksi. Nanokomposiiteissa lujite on nanokokoista. (Callister & Rethwisch, 2015) Lujitteen suuntaus voi olla komposiitissa tarkasti järjestetty tai sattumanvarainen. Lujite voi myös jatkua katkeamatta koko komposiitin läpi jatkuvina pitkinä kuituina tai kudottuna kankaana. (Agarwal, 1990; Douglas, et al., 2014; Mazumbar, 2002)

2.2 Partikkelivahvisteiset komposiitit

Partikkelivahvisteiset komposiitit jaetaan kahteen alaluokkaan: suurpartikkeli- ja dispersiovahvisteisiin komposiitteihin (Kuva 2). Nämä kaksi alaluokkaa eroavat toisistaan lujitteen koon suhteen. Dispersiovahvisteisissa komposiiteissa lujitepartikkelit ovat kooltaan 10–100 nm ja suurpartikkelivahvisteisissa komposiiteissa lujitepartikkelit ovat tätä suurempia. Tuttu esimerkki suurpartikkelivahvisteisesta komposiitista on betoni. Betonin matriisina toimii sementti, joka on vahvistettu hiekalla ja soralla. (Callister & Rethwisch, 2015)

Suurpartikkelivahvisteisia komposiitteja valmistetaan niin metalleista, polymeereistä kuin keraameistakin. Keraameista ja metalleista yhdistetään komposiitteja, joita kutsutaan kerametalleiksi. Yleisimmin käytössä olevat kerametallit ovat kovametalleja, joissa erittäin kovia keraamipartikkeleita kuten volframkarbidia on sekoitettu metallimatriisiin kuten kobolttiin tai nikkeliin. Tällaisia komposiitteja käytetään esimerkiksi metallien leikkuuteriin. Polymeerejä vahvistetaan myös monenlaisilla eri partikkeleilla. Esimerkiksi ajoneuvojen renkaihin käytettäviin kumeihin saadaan paljon lisää lujuutta vahvistamalla kuminen matriisi pallomaisilla hiilipartikkeleilla. Dispersiovahvisteisia komposiitteja ovat monet metallit ja metalliseokset, jotka ovat vahvistettu tasaisesti jakautuneilla pienhiukkasilla. Hiukkaset voivat olla niin metalleja kuin epämetallejakin. Esimerkiksi nikkelimetalliseosten lujuutta korkeissa lämpötiloissa voidaan parantaa huomattavasti vahvistamalla seos toriumoksidilla (ThO_2). (Callister & Rethwisch, 2015)

2.3 Kuituvahvisteiset komposiitit

Useimmat komposiiteissa käytetyistä lujitteista ovat erilaisia kuituja. Kuitumainen muoto on vahva ja jäykkä verrattuna muihin lujitemuotoihin. Kuidut sisältävät huomattavasti vähemmän lujuutta vähentäviä virheitä kuin sama materiaali bulkkimuodossa (Agarwal, 1990; Bunsell & Renard, 2005; Callister & Rethwisch, 2015). Eniten kuitumaisia lujitteita on tarjolla luonnossa. Selluloosasta koostuvia

luonnonkuituja saadaan erotettua kustannustehokkaasti monista kasveista kuten puuvillasta, pellavasta ja hampusta. Näistä lähteistä saatuja kuituja on hyödynnetty ja hyödynnetään edelleen erityisesti tekstiiliteollisuudessa. Paperiteollisuuden kuitulähteenä taas käytetään puuta ja olkea. Luonnossa esiintyy toki muitakin kuin selluloosapohjaisia kuitulähteitä. Proteiineista koostuvia eläinpohjaisia kuituja ovat esimerkiksi villa ja silkki. Lisäksi luonnossa on mineraalipohjaisia kuituja kuten asbesti. Selluloosapohjaiset kasvikuidut ovat kuitenkin yleisimmin käytettyjä erityisesti niiden halpuuden ja runsauden takia. (Chawla, 1987; Pickering, et al., 2016)

Kasveista peräisin olevilla selluloosakuiduilla on yleisesti ottaen korkeammat lujuusominaisuudet kuin eläinperäisillä proteiinikuiduilla. Esimerkiksi hampukkuitujen kimmokerroin vaihtelee välillä 27–80 GPa ja vetolujuus välillä 550–1110 MPa, kun villan kuitujen kimmokerroin vaihtelee välillä 2,3–5 GPa ja vetolujuus välillä 50–315 MPa. Hampukkuidun tiheys on $1,5 \text{ gcm}^{-3}$ ja villakuidun $1,3 \text{ gcm}^{-3}$. (Pickering, et al., 2016)

Kuitujen luonnosta eristämisen lisäksi ihminen valmistaa myös keinoitekoisesti useita erilaisia kuitumaisia lujitteita. Näistä kaupallisesti merkittävimpiä ovat lasi-, boori-, hiili-, aramidi- ja piikarbidikuidut (Gay & Hoa, 2007).

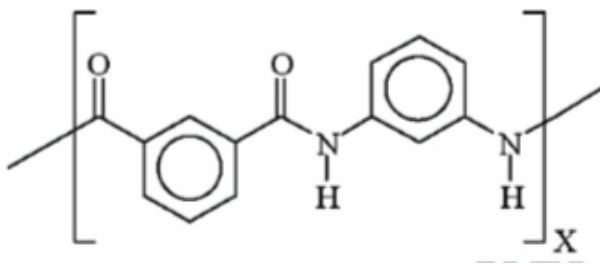
Lasikuidut ovat tavallisesti silikapohjaisia (SiO_2), mutta sisältävät myös muita oksideja. Lasikuidut valmistetaan sulattamalla raaka-aine ja kaatamalla sula lasi valupataan. Valupadan pohjalla on reikiä, joista sula lasi valuu painovoiman avulla muodostaen jatkuvia kuituja. Muodostuvat kuidut kerätään kokoon punokseksi ja kelataan rummun ympärille. Lasikuitu on suhteellisen kevyttä ($2,55 \text{ gcm}^{-3}$) erityisesti verrattuna vetolujuuteen (1750 MPa). Lasikuidun kimmokerroin ei ole erityisen korkea (70 GPa) tiheyteen nähden. Lasikuitu on halpaa ja sitä on saatavilla monissa eri muodoissa. Lasikuitua käytetään erityisesti polyesterin, epoksin tai fenolisten hartsien joukossa lujitteena. (Bunsell & Renard, 2005; Chawla, 1987)

Boorikuidut valmistetaan kemiallisesti höyrysaostamalla booria jollekin substraatille. Menetelmän hyödyntämiseen vaaditaan korkeaa lämpötilaa, joten myös substraatin on kestävä korkeaa lämpötilaa. Lämpötilavaatimuksen takia boorikuituun sopivia

substraatteja on tarjolla rajoitetusti, mutta volframikuitua pystytään hyödyntämään substraatiksi. Volframi on painavaa ($19,3 \text{ g/cm}^3$), mutta kokonaisen boorikuidun tiheys jää silti lasikuidun tasolle ($2,6 \text{ g/cm}^3$). Boorikuidun kimmokerroin on 380 ja 400 GPa:n välillä ja vetolujuus vaihtelee välillä 3000–4000 MPa. Boorikuidulla on siis erinomaiset lujuusominaisuudet, mutta laajaa hyödyntämistä rajoittaa kallis hinta. Boorikuituja hyödynnetään erityisesti lentokoneiden ja avaruusalusten rakenteissa sekä urheiluvälineissä kuten golf ja tennismailoissa. (Bunsell & Renard, 2005; Chawla, 1987)

Hiilikuitu on yleisnimitys joukolle hiilipohjaisia kuituja. Hiiltä esiintyy useissa eri allotropioissa, joista hiilikuidun valmistuksen kannalta mielenkiintoisin on grafiitti. Grafiitti on vahvasti anistrooppinen rakenne ja sen teoreettiset lujuusominaisuudet ovat korkeat. Hiilikuitujen valmistus perustuu tästä syystä pitkälti grafiitin orientoimiseen niin, että saavutetaan käyttökohteen vaatimat ominaisuudet. Hiilikuituja valmistetaan hieman vaihtelevin menetelmin, mutta kaikkia menetelmiä yhdistää tietyt vaiheet. Ensin valmistetaan esiastekuitu, jonka lujuusominaisuudet ovat lähtötilanteessa vielä alhaiset. Seuraavaksi esiastekuitu stabiloidaan, minkä tarkoitus on estää kuidun sulaminen korkeassa lämpötilassa. Stabilointia seuraa karbonointi, jossa korkean lämmön avulla höyrystetään kuidusta pois muut alkuaineet kuin hiiliosat. Valmiin hiilikuidun kimmokerroin vaihtelee välillä 200–650 GPa ja vetolujuus välillä 3000–8000 MPa riippuen prosessin parametreista sekä hyödynnetyistä esiastekuidusta. Hiilikuidun tiheys on $1,5 \text{ gcm}^{-3}$ eli lujuuteen nähden hiilikuidut ovat kevyitä (Chung, 1994). Hiilikuituja hyödynnetään vaativissa sovelluksissa esimerkiksi avaruustekniikassa ja urheiluvälineissä. Alati laskevan hinnan myötä hiilikuidut yleistyvät myös muilla aloilla esimerkiksi erinäisten koneiden osissa, joissa vaaditaan korkeaa suorituskykyä, kuten tuulimyllyjen lavoissa. (Bunsell & Renard, 2005; Callister & Rethwisch, 2015; Chawla, 1987)

Termillä aramidikuitu tarkoitetaan organisiin kuituihin kuuluvaa synteettistä ja aromaattista polyamidikuitua. Tavallisesti aramidikuidut koostuvat pääosin aromaattisista renkaista, jotka ovat linkitetty yhteen amidisidoksilla (Kuva 3).



Kuva 3. Aromaattiset renkaat linkitettyinä amidisidoksilla (Garcia, et al., 2010).

Yleisesti hyödynnetty tapa valmistaa aramidikuituja on polykondensoida diamiinia ja kaksihappoista halidia liuoksessa. Syntynyt polyamidi jauhetaan ja kuivataan sekä sekoitetaan rikkihappoon. Polyamidi-rikkihappo seos puristetaan suulakkeen läpi korotetussa lämpötilassa. Suulakkeen jälkeen kuitu kovettuu ilmassa ja happo poistetaan koagulaatoliuoksessa. Muodostunut kuitu kerätään liuoksesta kehräämällä rullalle. Aramidikuidut ovat aromaattisten renkaiden myötä kemiallisesti ja termisesti kestävämpiä ja jäykempiä kuin suoraketjuiset polyamidit. Aramidikuitujen kimmokerroin on noin 140 GPa ja tiheys $1,45 \text{ gcm}^{-3}$. Vetolujuus on noin 2800 MPa (Chen, et al., 2014). Aramidikuituja käytetään lujitteina polymeerikomposiiteissa, joita hyödynnetään lentokoneissa ja avaruustekniikassa. (Bunsell & Renard, 2005; Chawla, 1987; Liu, et al., 2010)

Piikarbidikuituja voidaan valmistaa kemiallisesti höyrysaostamalla volframin tai hiilen päälle samaan tapaan kuin valmistetaan boorikuituja. Piikarbidikuidut kestävät todella korkeita lämpötiloja mikä tekee niistä mielenkiintoisen lujitevaihtoehdon, kun suunnitellaan komposiittia korkean lämpötilan sovellukseen. Piikarbidikuitujen vetolujuus on luokkaa 3500 MPa ja kimmokerroin 430 GPa. Tiheys piikarbidikuiduilla on suhteellisen korkea noin $3,3 \text{ gcm}^{-3}$ (Bunsell & Renard, 2005; Chawla, 1987; Mazumbar, 2002).

2.4 Komposiiteissa hyödynnettävät matriisimateriaalit

Komposiiteissa matriisimateriaalina hyödynnetään polymeerejä, metalleja ja keraameja (Gay & Hoa, 2007). Polymeerit ovat suuria makromolekyyliä, jotka

valmistetaan ketjuttamalla pieniä molekyylejä eli monomeereja yhteen. Monomerien toisiinsa liittymistä eli polymeerin muodostumista kutsutaan polymerisaatioksi. Polymerisaatio voidaan jakaa kahteen polymerisaatiotyyppiin: kondensaatio- ja additiopolymerisaatioon. Kondensaatiopolymerisaatiossa kahden monomeerin välistä irtoaa pieni molekyyli monomeerien liittyessä yhteen. Additiopolymeraatiossa monomeerit liittyvät toisiinsa ilman sivutuotteiden syntymistä. Polymerisaatio voidaan käynnistää esimerkiksi kasvattamalla lämpötilaa ja painetta tai aktivoivan kemikaalin eli kovetteen avulla. (Callister & Rethwisch, 2015; Chawla, 1987)

Additiopolymerisaation avulla valmistetaan kestopuoveja. Kestomuovit ovat alhaisissa lämpötiloissa kiinteitä ja lämpötilaa ja painetta kasvattamalla kestopuovi pehmenee ja lopulta sulaa. Kondensaatiopolymerisaation seurauksena syntyy kertamuoveja. Kertamuovit kovettuvat polymerisaation seurauksena ja viereiset polymeeriketjut silloittuvat (cross-linkage) toisiinsa kiinni. Toisin kuin kestopuovi, kertamuovi ei pehmenee ja sulaa lämpötilaa nostamalla. (Bunsell & Renard, 2005; Chawla, 1987)

Polymeerit ovat kemiallisesti usein orgaanisia yhdisteitä, jotka koostuvat hiilestä ja vedystä sekä epämetallisista alkuaineista. Vaikka polymeerit ovat rakenteeltaan monimutkaisempia kuin metallit ja keraamit, ne kestävät huomattavasti huonommin mekaanista rasitusta. Tosin polymeerit ovat kevyempiä kuin metallit tai keraamit. Polymeerin lujuus suhteessa sen tiheyteen voi siten olla verrannollinen metallin tai keraamin suhteelliseen lujuuteen. Polymeerit eivät kestä niin korkeita lämpötiloja kuin metallit ja keraamit, mutta samalla ne ovat helposti prosessoitavia. Polymeerit kestävät kuitenkin metalleja paremmin monia kemikaaleja. Polymeerit eristävät hyvin lämpöä sekä johtavat huonosti sähköä, koska ne rakentuvat pääasiassa kovalenttisista sidoksista. Lisäksi ne hajoavat pitkän ajan kuluessa ultraviolettivalon vaikutuksesta. (Bunsell & Renard, 2005; Callister & Rethwisch, 2015; Chawla, 1987; Mazumbar, 2002)

Metallit koostuvat yhdestä tai useammasta metallisesta alkuaineesta ja usein myös pienistä määristä epämetalleja. Metallien atomirakenne on järjestäytynyt ja polymeerejä ja keraameja tiheämpi. Metallit ovat mekaanisilta ominaisuuksiltaan tiheitä ja jäykkiä, mutta myös sitkeitä. Metallien atomirakenteessa on paljon vapaita elektroneja. Vapaiden elektronien vuoksi metallit johtavat hyvin sähköä ja lämpöä. (Callister & Rethwisch, 2015; Mazumbar, 2002)

Keraamit ovat kovia, hauraita ja korkeita lämpötiloja kestäviä materiaaleja. Kemiallisesti keraamit koostuvat metalleista, jotka ovat liittyneet epämetalliin, kuten esimerkiksi happeen tai hiileen. Tyypillisesti keraamit ovat eristäviä eli ne johtavat heikosti lämpöä ja sähköä. Keraamit rakentuvat vahvoista kovalenttisista ja ionisidoksista eikä rakenne pääse joustamaan. Tästä johtuen keraameilla on korkea kimmokerroin ja ne eivät juuri veny tai taivu ennen kuin murtuvat. Keraamien hauraus on materiaaliryhmän suurin haaste. Todella alhainen iskutkeys johtaa siihen, että pienetkin virheet materiaalissa voivat aiheuttaa koko kappaleen murtumisen. (Callister & Rethwisch, 2015; Chawla, 1987; Mazumbar, 2002)

2.5 Puu-muovikomposiitit ja niiden käyttökohteet

Puu-muovikomposiiteilla viitataan usein komposiitteihin, jotka koostuvat kasviperäisistä kuiduista ja joko kerta- tai kestopuuvista (Ashori, 2008). Luonnonkuitu, kuten puun selluloosakuidut, on uusiutuva, helposti saatavilla oleva ja ympäristöystävällinen materiaaliveikotiehto. Luonnonkuidut ovat lähtökohtaisesti halpoja ja niillä hyviä ominaisuuksia, kuten korkea jäykkyys ja lujuus suhteessa tiheyteen. Luonnonkuitujen hyödyntäminen tietyissä sovelluksissa on kuitenkin haasteellista verrattuna synteettisiin kuituihin. Luonnonkuitujen laatu vaihtelee enemmän kuin synteettisten kuitujen, niiden lämpöstabiilius on huonompi ja ne ovat herkkiä kosteudelle (Marcovich, et al., 1998). Lisäksi korkea veden vastaanottokyky heikentää matriisin ja lujitteen välistä sitoutumista ja heikentää komposiitin mekaanisia ominaisuuksia. Kosteus muuttaa myös puun dimensioita. Suora auringon valo pilkkoo ajan myötä luonnonkuitujen sidoksia, mikä vaikeuttaa luonnonkuitujen

hyödyntämistä ulkotiloissa. (Ashori, 2008; Begum & Islam, 2013; Hughes & Hill 2010; Kaushik & Jin, 2010; Pickering, et al., 2016)

Eri lujitteiden vaikutusta eri matriisien lujuusominaisuuksiin on vaikea verrata täsmällisesti kirjallisuuden perusteella. Vaikka kahdessa eri tutkimuksessa oltaisiin käytetty esimerkiksi saman nimistä materiaalia matriisina, tutkimukset voivat poiketa valmistustavan tai esimerkiksi käytetyn kovetteen tai muiden kemikaalien osalta. Karkeasti arvioiden voidaan kuitenkin todeta, että synteettiset kuidut, kuten lasi-, hiili- ja boorikuidut, nostavat matriisien lujuusominaisuuksia enemmän kuin luonnonkuidut. (Begum & Islam, 2013)

Luonnonkuidut ovat yleensä synteettisiä kuituja kevyempiä. Vaikka luonnonkuidut eivät lujuusominaisuuksissa suoraan pärjäisi synteettisille kuiduille, voivat ne kevyempänä materiaalina olla kilpailukykyinen ratkaisu sovelluksiin, joissa keveys on merkittävä etu. Tästä syystä komposiiteissa käytetäänkin usein luonnonkuituja esimerkiksi pakkaus-, kuljetus-, ja autoteollisuudessa. (Begum & Islam, 2013)

Viime vuosina kasvanut ympäristötietoisuus on aiheuttanut painetta kehittää ja hyödyntää ympäristöystävällisempiä ratkaisuja ja prosesseja myös komposiittiteollisuudessa. Synteettisiä lujitteita korvataan luonnosta saatavilla uusiutuvilla materiaaleilla, jotta tuotteisiin saataisiin maksimoitua uusiutuvan materiaalin osuus. (Ashori, 2008; Kaushik & Jin, 2010)

Suurin osa puu-muovikomposiiteista käytetään rakentamiseen erityisesti ulkotilojen lattioihin, kaiteisiin, penkkeihin ja aitoihin sekä ikkunoiden ja ovien karmeihin. Sisätiloissa puu-muovikomposiitteja käytetään mm. huonekalumateriaaleina. Mainituissa sovelluksissa käytetään myös puuta tai muovia. Puuhun verrattuna puu-muovikomposiitti vaatii kuitenkin vähemmän huoltoa ja voi olla myös ympäristöystävällisempi vaihtoehto ainakin ulkotiloissa ja muissa kosteissa kohteissa. Jos puuta halutaan käyttää kosteissa olosuhteissa, se on usein käsiteltävä kemiallisesti tai on käytettävä harvinaisempia lahonkestäviä lajeja. Mekaanisten ominaisuuksien puolesta puumuovikomposiitit ovat usein puun ja muovin välinen kompromissi. Puu-muovikomposiitit ovat umpinaiseen puuhun verrattuna

merkittävästi vähemmän jäykkiä, mutta jäykempiä kuin lujittamaton muovi. (Cai & Ross, 2010; Kaushik & Jin, 2010; Pickering, et al., 2016; Pritchard, 2004)

Rakennusteollisuuden jälkeen puu-muovikomposiittien seuraavaksi merkittävin käyttökohde on autoteollisuus. Autoissa on paljon muoviosia erityisesti sisätiloissa ja eristeissä. Esimerkiksi tyypillisesti kojelauta on muovinen. Käyttämällä kevyitä puu-muovikomposiitteja muovin, lasikuidun tai jopa teräksen sijaan voidaan valmistaa kevyempiä osia ja vähentää kulkuneuvon painoa ja polttoaineen kulutusta. Puu-muovikomposiittien avulla voidaan parantaa myös autojen sisätilojen esteettisyyttä. (Ashori, 2008; Kaushik & Jin, 2010; Pritchard, 2004)

3 Komposiitin hajoaminen

Tämä luku antaa yleiskuvan komposiittien rakenteen ja hajoamismekanismien välisestä yhteydestä sekä esittelee puu-muovikomposiittien lujuuden erityispiirteet. Alaluvussa 3.1 jaotellaan komposiitin komponenttien tehtävät. Alaluku 3.2 käsittelee voiman siirtymistä partikkeli- ja kuituvahvisteisissa komposiiteissa ja alaluku 3.3 keskittyy matriisin ja kuitujen välisen adheesion vaikutukseen komposiittien hajoamisessa. Lopuksi alaluvussa 3.4 pohditaan puu-muovikomposiittien tyypillisiä käyttö- ja valmistusrajoitteita.

3.1 Komponenttien tehtävät

Rakenteet suunnitellaan palvelemaan jotakin tarkoitusta, kuten kestämiään tietyn suuruista ja suuntaista voimaa. Mikäli rakenteeseen kohdistunut voima aiheuttaa murtumia, se voi olla merkki rakenteen toimimattomuudesta. Toisaalta, vaikka matriisiin olisi tullut vaurio, komposiitti saattaa kestää merkittävää kuormaa. Rakenteilla voi toki olla myös muita vaatimuksia. Termi kestävyys kuvaa materiaalien ja myös komposiittien kykyä säilyttää käyttökohteelle määritellyt ominaisuudet liittyen esimerkiksi lujuuteen, jäykkyyteen ja ympäristön olosuhteiden vastustuskykyyn. (Talreja, 2015; Singh & Talreja, 2012)

Komposiitin mekaaniset ominaisuudet määrittyvät materiaalivalintojen ja valmistustavan perusteella. Merkittävimmät muuttujat ovat matriisin ja lujitteen tyyppi sekä niiden välinen adheesio. Jos komposiitti prosessoidaan huoneenlämpötilassa, hyödynnetään yleensä kovetetta ja silloittajaa (cross-linking agent), joten myös kovete- ja silloittajavalinnat ja näiden aineiden osuudet vaikuttavat lopullisiin ominaisuuksiin. Erilaiset valmistustavat aiheuttavat komposiitteihin myös vaihtelevia määriä vikoja (defects), jotka vaikuttavat lopulliseen lujuuteen. (Begum & Islam, 2013; Pickering, et al., 2016)

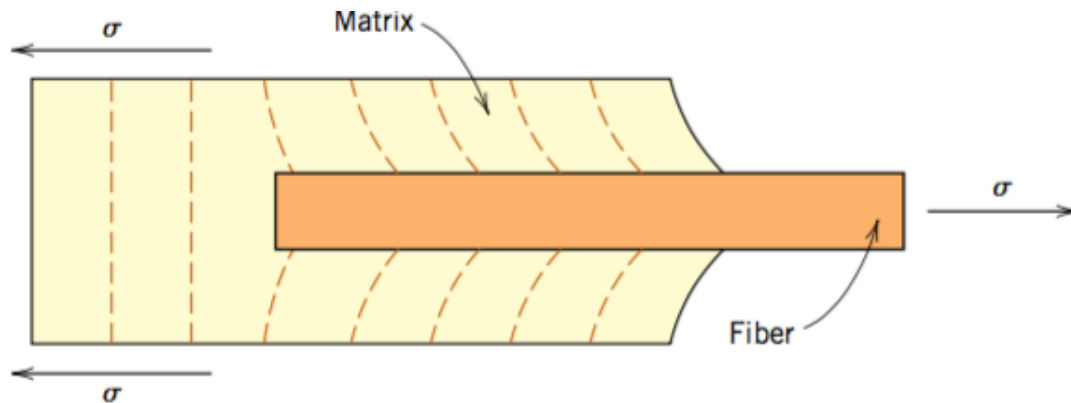
Matriisimateriaalin lujuusominaisuudet eivät sellaisinaan riitä jäykkyyttä vaativiin sovelluksiin. Siksi matriisia vahvistetaan lujitteella, joka on mekaanisilta

ominaisuuksiltaan matriisia vahvempaa ja tiheämpää. Lujitteen osuuden lisäys kasvattaa yleensä veto-, ja taivutusominaisuuksia, mutta vain siihen asti kunnes lujitteen ja matriisin välinen adheesio alkaa heiketä. Matriisin tehtävänä on ympäröidä lujitetta pitäen sitä paikallaan ja suojata lujitetta ympäristön vaikutuksilta ja kulumiselta. Yhdessä matriisi ja lujite voivat parhaassa tapauksessa muodostaa kevyen ja vahvan komposiitin. (Begum & Islam, 2013; Callister & Rethwisch, 2015; Pickering, et al., 2016)

3.2 Voiman siirtyminen partikkeli- ja kuituvahvisteisissa komposiiteissa

Partikkelivahvisteisissa komposiiteissa partikkelien tarkoitus on rajoittaa matriisin deformaatiota, kun rakenteeseen kohdistetaan jännitystä. Jokainen partikkeli tukee välittömässä läheisyydessä olevaa matriisia ottamalla vastaan osan rakenteeseen aiheutuvasta jännityksestä. Partikkelivahvisteisessa komposiitissa jännityksen siirtyminen lujitteeseen perustuu partikkelien ja matriisin väliseen vahvaan sitoutumiseen. Partikkelien tulee myös olla tasaisesti jakautuneina matriisin sekaan sekä tasakokoisia ja tarpeeksi pieniä, jotta matriisi on tuettu joka puolelta. (Callister & Rethwisch, 2015)

Kuituvahvisteisissa komposiiteissa voiman siirtymiseen matriisista lujitteeseen vaikuttaa rajapinnan lisäksi lujitteen pituus ja suuntaus. Kun matriisiin kohdistuu jännitystä, matriisi deformatuu ja jännitys välittyy kuitujen ja matriisin välisen rajapinnan kautta kuitujen keskiosiin. Kuitujen kärkiin ei välity jännitystä. Kuva 4 havainnollistaa miten jännityksessä oleva deformatunut matriisi vetää kuitua jolloin kuitu ottaa vastaan osan jännityksestä.



Kuva 4. Jännitys välittyy matriisista kuidun keskiosaan (Callister & Rethwisch, 2015).

Mikäli kuidut ovat pitkiä, on voiman siirtyminen kuituihin tehokasta. Pitkiin kuituihin matriisiin ja kuidun välinen rajapinta siirtää voimaa jokaiseen kuituun pitkältä matkalta. Tällöin kuidut ottavat vastaan paljon jännitystä. Lyhyissä kuiduissa tällaista voiman siirtymistä tapahtuu vain vähän ja lyhyillä kuiduilla vahvistetut komposiitit toimivatkin enemmän partikkelivahvisteisten komposiittien tavoin. (Callister & Rethwisch, 2015)

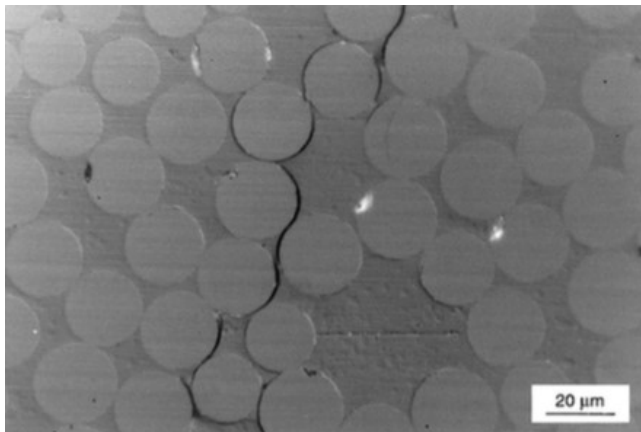
Kuvan 4 mukaisessa tilanteessa jännitys kohdistuu kuituun pituussuuntaisesti. Jos kuitu on suunnattu eri tavoin, ei jännitys välity enää samalla tavalla. Esimerkiksi jännityksen ollessa kuidun poikkisuuntaan nähden kohtisuora kuitu pystyy vastaanottamaan jännitystä vain vähän. Lisäksi kuitujen lujuusominaisuudet poikittaissuuntaan ovat yleensä murto-osa pituussuuntaisesta lujuudesta. Poikittaissuuntaiseen jännitykseen kuitujen tuoma hyöty komposiitin lujuudelle on olematonta tai voi olla jopa negatiivinen. Täten pelkän puhtaan matriisin lujuus voi olla korkeampi kuin komposiitin, jonka kuidut ovat poikkisuuntaan vaikuttavaan jännitykseen nähden. (Callister & Rethwisch, 2015)

3.3 Komposiitin hajoaminen

Komposiitit voivat menettää rakenteellisen eheydensä eli hajota monilla erilaisilla tavoilla. Komposiittien hajoamismekanismit eroavat yhtenäisten materiaalien, kuten metallien tai keraamien, hajoamismekanismeista. Hajoamismekanismien

moninaisuus johtuu erityisesti siitä, että komposiitit ovat heterogeenisiä rakenteita, joiden eri komponenttien ominaisuudet vaihtelevat yleensä suuresti. Lisäksi komposiiteissa lujitteen ja matriisin välillä on rajapinta ja lujitekomponentti on usein vahvasti anistrooppinen. (Singh & Talreja, 2012)

Komposiitin kestävyys vaikuttaa merkittävästi lujitteen ja matriisin välisen rajapinnan ominaisuudet. Rajapinnan tehtävänä on välittää komposiittiin kohdistuvaa voimaa matriisiin ja sitä vahvemman tiheämmän lujitteen välillä (Gay & Hoa, 2007). Jos lujitteen ja matriisin välinen rajapinta on heikko, rajapinta murtuu (Kuva 5). Murtunut rajapinta ei välitä voimaa lujitteeseen ja matriisi vastaanottaa rakenteeseen kohdistuvan voiman. Matriisin ollessa lujitetta heikompaa, alkaa matriisiin muodostua murtumia jo alhaisessa kuormituksessa. Matriisin murtumat eivät välttämättä tarkoita, että rakenne olisi vaarassa haljeta tai romahtaa kokonaan. Murtumat kuitenkin todennäköisesti heikentävät komposiitin jäykkyyttä ja voivat edesauttaa vakavampien vaurioiden syntymistä. (Gay & Hoa, 2007; Pickering, et al., 2016; Singh & Talreja, 2012)



Kuva 5. Lujitteen ja matriisin välinen rajapinta on murtunut (Gamstedt & Sjögren, 1999).

Mikäli lujitteen ja matriisin välinen rajapinta on todella vahva, murtuvat lujite ja matriisi eli koko komposiitti kerralla. Tällainen komposiitin rakenne on hyvin jäykkä ja hauras. Jäykän ja hauraan komposiitin murtuessa murtuma etenee nopeasti ja komposiitti menettää ominaisuutensa hetkessä. (Singh & Talreja, 2012)

Jos komposiitti on sitkeä (toughness), se pystyy vastustamaan murtuman etenemistä, kun materiaalissa on jo murtuma. Tämä johtuu siitä, että komposiitti pystyy absorboimaan paljon energiaa ennen kuin se lopullisesti murtuu. (Callister & Rethwisch, 2015)

Komposiittien sekä muidenkin materiaalien mitatut murtolujuudet ovat paljon alhaisempia kuin mitä atomien välisiin sidosenergioihin perustuvat laskelmat antaisivat olettaa. Tämä johtuu siitä, että komposiitit eivät ole koskaan täydellisiä. Komposiittien jalostuksessa, valmistuksessa ja käytössä syntyy aina vikoja. Yleisesti syntyviä vikoja ovat lujitemateriaalin epätasainen jakautuminen ja suuntautuminen, valmiiksi rikkoutuneet kuidut sekä matriisiin ja lujitteen välinen huono sitoutuminen. Komposiittien valmistuksen kannalta merkittävin ongelma on tyhjät ontelot ja huokokset, joita jää kaiken tyyppisiin komposiittirakenteisiin. Huokosia syntyy komposiitteihin mm. lujitteen sisältämistä virheellisistä rakenteista, ilman sekoittumisesta matriisiin valmistuksen aikana ja lujitteen epätäydellisestä kastumisesta (wetting) matriisiin (Pickering, et al., 2016). Huokokset heikentävät jo pienissä määrin komposiittien ominaisuuksia merkittävästi. Huokosten syntymistä voidaan kontrolloida valmistusprosessin parametreilla kuten vakuumilla, kovettumislämpötilalla ja paineella sekä matriisin viskositeetilla. (Agarwal, 1990; Callister & Rethwisch, 2015; Francois, et al., 2013; Singh & Talreja, 2012)

Viat keskittävät materiaalin kokemaan voimaa eli tehollinen jännitys on yksittäisissä kohdissa suurempi kuin vaikuttava jännitys (Francois, et al., 2013). Esimerkiksi, jos oletetaan materiaalissa olevan soikean reiän muotoinen halkeama, joka on orientoitu kohtisuorasti vaikuttavaan jännitykseen, voidaan tehollinen jännitys laskea yhtälöllä 1.

$$\sigma_m = 2\sigma_0 \sqrt{\left(\frac{a}{\rho_t}\right)} \quad (1)$$

Yhtälössä σ_m on tehollinen jännitys, σ_0 on vaikuttava jännitys, ρ_t on halkeaman kärjen säde ja a puolet halkeaman pituudesta. Yhtälöstä havaitaan, että halkeaman ollessa pitkä ja terävä, tehollinen jännitys moninkertaistuu vaikuttavaan jännitykseen

nähdén. Siten varsinkin pitkät ja terävät halkeamat heikentävät komposiitin murtolujuutta. (Callister & Rethwisch, 2015)

3.4 Puu-muovikomposiitin valmistuksen ja käytön rajoitteita

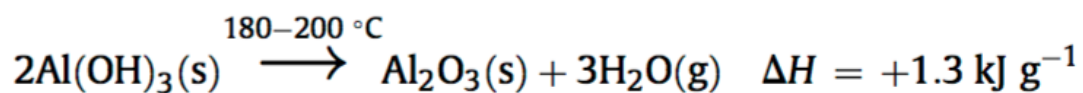
Puu-muovikomposiitin valmistukseen sekä käyttöön liittyy haasteita. Luvussa 3.3 todettiin lujitteen ja matriisin välisen rajapinnan lujuuden olevan tärkeä voiman tehokkaan siirtymisen kannalta. Muovin lujittaminen puisella lujitteella on tästä syystä vaikeaa. Selluloosan ja hemiselluloosan vapaat hydroksyyli-ryhmät tekevät puusta hydrofiilisen. Hydrofiilisen puun ja hydrofobisen muovin välillä on lähtökohtaisesti huono yhteensopivuus, mikä voi johtaa heikkoon puun ja muovin väliseen adheesioon. (Ashori, 2008; Gardner, et al., 2015; Kaushik & Jin, 2010; Pickering, et al., 2016)

Jos matriisina käytetään kestopuuvia, se sulatetaan lämmöllä puisen lujitteen ja matriisin sekoittamista varten. Tällöin puun ominaisuudet saattavat aiheuttaa haasteita puu-muovikomposiitin valmistuksessa, sillä puumateriaali alkaa hajota jo suhteellisen alhaisessa noin 220 °C lämpötilassa (Gardner, et al., 2015). Valmistuslämpötilan lisäksi myös valmiin puu-muovikomposiitin käyttölämpötila-alue on tyypillisesti rajattu. Se määräytyy matriisivalinnan mukaan, sillä muovin pehmeneminen, sulaminen tai hajoaminen lämpötilan vaikutuksesta tapahtuu yleensä ennen kuin puun. (Callister & Rethwisch, 2015)

Orgaanisina polymeereina muovi ja puu ovat tulenarkoja. Tulenarkuus rajoittaa sovelluksia, joihin puu-muovikomposiitteja voidaan käyttää. Puu-muovikomposiitteja voidaan käsitellä paremmin palamista kestäviksi mm. halogenoiduilla palonestoaineilla, alumiinitrihydroksidilla (ATH), magnesiumhydroksidilla tai ammoniumpolyfosfaatilla. Yllämainitut palonestoaineet eivät ole ongelmattomia ratkaisuja. Halogenointi lisää palamistilanteessa savun ja hiilimonoksidin syntymistä. ATH:ta, magnesiumhydroksidia ja ammoniumpolyfosfaattia taas joudutaan lisäämään suuria määriä, jotta palon estäminen olisi tehokasta. Tällöin komposiitin tiheys kasvaa ja mekaaniset ominaisuudet erityisesti painoon nähden usein laskevat.

Mekaanisten ominaisuuksien laskua voi aiheuttaa esimerkiksi palonestoaineen huono sitoutuminen komposiittiin. (Duquesne, et al., 2013; Kaushik & Jin, 2010)

ATH:lla on toisaalta monia edullisia ominaisuuksia. Se on halpaa, aiheuttaa vähän päästöjä ja korroosiota sekä tuottaa palaessaan vähän savua. Kuumennettaessa ATH alkaa hajoamaan 180–230 °C lämpötilassa ja 350 °C lämpötilassa hajoamistuotteena syntyy vesihöyryä. ATH:n hajoaminen on endoterminen reaktio eli se sitoo ympäriltään lämpöä ja viilentää polymeeriä. Syntynyt höyry taas laimentaa syntyneitä palamiskaasuja. Palamisreaktio vaatii riittävän konsentraation vapaita radikaaleja pysyäksään käynnissä. (Hull, et al., 2011; Sliwa, et al., 2015) ATH:n hajoamisreaktio on esitettyä alla (Hull, et al., 2011).



4 Puu-muovikomposiitin käyttö kylpyhuonekalusteissa

Tässä luvussa vertaillaan Woodion puu-muovikomposiitin ja posliinin hyödyntämistä kylpyhuonekalusteissa. Alaluvussa 4.1 esitellään molempien materiaalien raaka-ainesisällöt. Alaluvussa 4.2 vertaillaan raaka-aineita. Ala-luku 4.3 käsittelee valmistusmenetelmien ekologisuutta. Viimeisessä ala-luvussa 4.4 pohditaan materiaalien loppukäyttömahdollisuuksia.

4.1 Kylpyhuonekalustemateriaalit

Perinteisesti kylpyhuonekalusteet, kuten wc-istuimet, käsienpesualtaat ja kylpyammeet, ovat valmistettu posliinista. Posliinin raaka-aineet ovat kvartsi, savi ja maasälpä. Posliinin valmistuksessa raaka-aineet sekoitetaan halutuissa suhteissa ja seokseen lisätään vettä. Kasteltu seos voidaan muotoilla haluttuun muotoon, jonka jälkeen massa kuivataan ja poltetaan. (Callister & Rethwisch, 2015)

Woodio on tuonut markkinoille puu-muovikomposiittimateriaalin korvaamaan kylpyhuonekalusteissa perinteisesti käytettyä posliinia. Woodion komposiitti koostuu haapalastuista, jotka on sidottu yhteen läpinäkyvällä polyesterillä. Tuotteen on tarkoitus tarjota kuluttajalle sekä ympäristöystävällinen että inspiroiva ratkaisu kylpyhuoneeseen. Haapalastuja voidaan värjätä, joten tuotteet voidaan valmistaa eri värisävyissä. Toistaiseksi tästä komposiitista on saatavilla kaupallisesti käsienpesualtaita. (Woodio, 2019) Kuvassa 6 esitellään yksi tämän tuoteryhmän tuote.



Kuva 6. Woodion kehittämästä komposiitista valmistettu käsienspesuallas (Woodio, 2019).

4.2 Raaka-aineiden vertailu

Posliinin pääasiallinen raaka-aine on savi. Savi on halpaa ja sitä löytyy luonnosta runsaasti. Usein savea voidaan louhia ja käyttää sellaisenaan ilman jatkojalostamista. Valmistusteknillisesti saven suurena etuna on sen muovautuvuus märkänä. Tästä syystä posliinin massa kastellaan. (Callister & Rethwisch, 2015)

Woodion komposiitin tilavuudesta suurin osa on haapaa. Kaadettu haapa täytyy kuoria, työstää lastuiksi ja kuivata ennen kuin sitä voidaan käyttää komposiitin valmistukseen. Haapa vaatii siis enemmän energiaa vaativaa jalostusta kuin posliinissa hyödynnetty savi. Puun työstäminen vaatii kuitenkin hyvin vähän energiaa verrattuna moniin muihin materiaaleihin. (Csanady & Magoss, 2013)

Luonnonmateriaalina haapa kuten muutkin puulajit ovat uusiutuva luonnonvara. Haavan saatavuus on siis hyvä nyt ja todennäköisesti jatkossakin. Puu sitoo kasvaessaan ilmasta hiilidioksidia ja täten pienentää tuotteen hiilijalanjälkeä. Ekologisten hyötyjen lisäksi puu tarjoaa materiaalina myös psykologisia hyötyjä. Puun

hyödyntäminen sisätiloissa edistää psyykkistä hyvinvointia ja puun esteettisyydellä on huomattu olevan terapeuttisia vaikutuksia. (Cronhjort, et al., 2016)

4.3 Valmistusmenetelmien ekologisuuden vertailu

Posliinin ja muidenkin keraamien valmistuksessa oleellinen vaihe on raaka-ainemassan polttaminen. Polttovaiheessa syntyy keraamiin valkoinen väri sekä halutut mekaaniset ominaisuudet. Polttaminen korkeassa noin 1200 °C lämpötilassa vaatii paljon energiaa (Jaglarz, 2015; Medina, et al., 2012). Siksi posliinin valmistaminen aiheuttaa merkittävästi päästöjä. (Callister & Rethwisch, 2015)

Woodion komposiitti voidaan valmistaa normaalissa huoneenlämpötilassa. Tuotteet valmistetaan muoteilla, jotka täytetään haapahakkeella ja suljetaan. Seuraavaksi muottiin injektoidaan polyesterihartsia, joka pysyy nestemäisenä ilman erillistä lämmitystä ja polymerisoidaan kovettajan avulla. Kun posliinin valmistukselle tyypillistä polttovaihetta eikä muitakaan paljon energiaa kuluttavia valmistusvaiheita tarvita, Woodion komposiitin valmistusmenetelmä on ekologisesti ylivoimainen posliiniin nähden. Woodion komposiitissa hyödynnetty hartsia on kertamuovia, jonka käyttö on valmistusteknisesti helpompaa kuin kestopuun sulattaminen. Lisäksi kestopuun sulatus korotetussa lämpötilassa on vahingollista puulle, koska se alkaa värjäytyä ja hajota suhteellisen alhaisissa lämpötiloissa. (Ashori, 2008)

4.4 Loppukäyttömahdollisuuksien vertailu

Jossain vaiheessa tuotteen elinkaarta tuote muuttuu käyttökelvottomaksi tai tarpeettomaksi ja siitä on tavalla tai toisella päästävä eroon. Ideaalitulanteessa posliinisten kylpyhuonekalusteiden materiaali voidaan käyttää uudestaan muissa sovelluksissa. Keraamisilla jätteillä on monia kiinnostavia ominaisuuksia, kuten korkea lujuus, kulutuksen kesto, kemiallinen inerttiys, myrkyttömyys ja sekä lämmön-että palonkestävyys. Murskattua posliinia voidaan hyödyntää esimerkiksi teiden rakennusaineena sekä korvaamaan betonin valmistuksessa soraa. (Jaglarz, 2015; Medina, et al., 2012)

Woodio:n komposiitin komponentteja eli puuta ja polyesteria on vaikeaa uudelleen käyttää enää muihin sovelluksiin. Koska polyesteri on kertamuovi, sitä ei pystytä lämmöllä sulattamaan ja tätä kautta erottamaan komponentteja toisistaan (Bunsell & Renard, 2005; Chawla, 1987). Materiaalia ei kuitenkaan tarvitse läjittää kaatopaikalle, vaan se voidaan polttaa energiajätteenä (Woodio, 2019).

KOKEELLINEN OSA

5 Materiaalit ja menetelmät

Kokeellisen osan tavoitteena oli vertailla Woodion komposiitin vaihtoehtoisia valmistusreseptejä ja -menetelmiä ja määrittää komposiittien taivutus-, veto- ja iskulujuudet. Tässä luvussa selostetaan yksityiskohtaisesti testimateriaalien eli noin 6 mm paksujen komposiittilevyjen eri valmistusprosessit sekä suoritettujen kokeiden koejärjestelyt. Komposiittien valmistusprosessit kuvataan alaluvuissa 5.1.1–5.1.4. Alaluvuissa 5.2–5.4 kuvataan taivutus-, veto-, ja iskulujuuskokeiden koejärjestelyt sekä testeissä hyödynnettyjen näytekappaleiden työstömenetelmät. Komposiitit valmistettiin Woodion laboratoriossa Otaniemessä ja lujuuskokeet suoritettiin Aalto-yliopiston Kemian ja materiaalitekniikan sekä Biotuotteiden ja biotekniikan laitoksilla.

5.1 Testimateriaalin valmistus

Komposiittien valmistamiseen käytettiin kahta raekooltaan erilaista haapahaketta. Pienempää haketta käytettiin luvussa 5.1.2 kuvatussa komposiitissa ja raekooltaan suurempaa haketta käytettiin kaikissa muissa komposiiteissa. Molemmat hakkeet koostuvat epätasaisen kokoisesta lastumaisesta rakeesta, jossa on mukana myös puun oksakohdat. Hakkeet eivät sisältäneet mitään ei-puuperäisiä epäpuhtauksia tai roskia. Kuvassa 7 näkyy testimateriaaliin käytettyä haapahaketta.

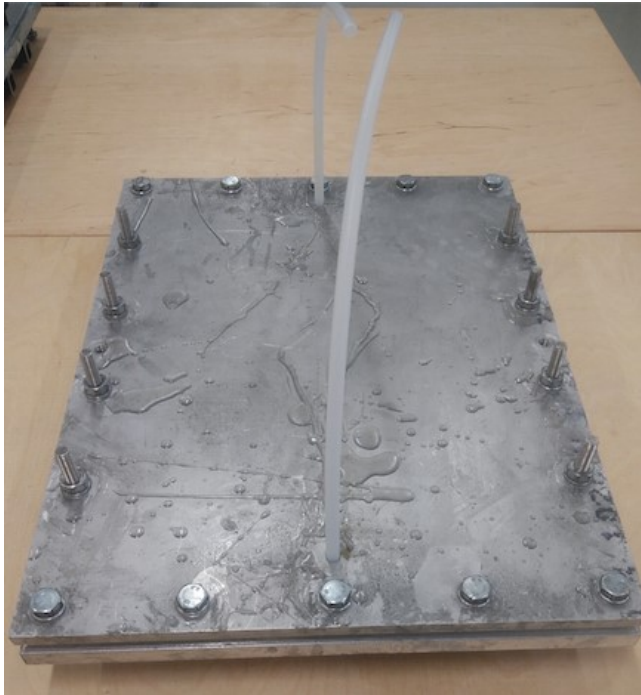


Kuva 7. Testimateriaaleissa käytettyä haapahaketta.

5.1.1 Valmistus alkuperäisellä reseptillä

Alkuperäinen resepti oli tämän diplomityön aloitusvaiheessa Woodiolla käytössä ollut resepti. Alkuperäisen reseptin mukainen testimateriaali valmistettiin täyttämällä kaksiosainen alumiininen testimateriaalimuotti haapahakkeella ja injektoimalla täytettyyn muottiin hartsiseosta pumpun avulla. Muotti oli sisädimensioiltaan 284x383x6 mm ja se oli vahattu sekä kiillotettu irrotusainevahalla.

Kiillotettu muotti täytettiin kuivatulla raekooltaan suuremmalla haapahakkeella. Hake oli kuivattu 100 °C lämpötilassa, kunnes hakkeen massa pysyi vakiona. Hakkeen määrä mitattiin ja siroteltiin muottiin. Hakepeti paineltiin käsin mahdollisimman tasaiseksi, jonka jälkeen muotti suljettiin ruuvaamalla täysin kiinni. Muotti näkyy suljettuna kuvassa 8.



Kuva 8. Testimateriaalimuotti täytettynä hakkeella.

Hartsiseos valmistettiin punnitsemalla hartsia, johon sekoitettiin lastan avulla Potters lasijauhetta kahden minuutin ajan. Seokseen lisättiin metyylietyyliketoniperoksidi -kovetetta ja sekoitettiin lastalla minuutin ajan. Harts sisältää pääosin styreeniä sekä metyylimetakrylaattia.

Hartsiseoksen annettiin tasaantua kolme minuuttia, jonka jälkeen se pumpattiin alakautta pystyasennossa olevaan alumiinimuottiin injektointireiän kautta Verdexflex Vantage 3000 -pumpulla. Hartsiseoksen pumpausta jatkettiin, kunnes hartsiseosta kulkeutui ulos muotin poistoreiästä. Täyttö lopetettiin, kun poistoreiästä ylivuotavan hartsiseoksen mukana kulkevat ilmakuplat olivat vähentyneet merkittävästi.

Injektointiletkut katkottiin ja tukittiin ja muotti siirrettiin 70 °C lämpötilaan kovettumaan kolmeksi tunniksi. Kuumennuksen jälkeen muotin annettiin jäähtyä huoneenlämmössä vähintään kolme tuntia. Valmistettu kappale punnittiin sen puupitoisuuden selvittämiseksi heti muotin avaamisen jälkeen. Puuhakkeen osuus

komposiittilevyissä laskettiin käytetyn hakkeen ja valmiin kappaleen punnitustuloksista yhtälön 2 mukaan.

$$Puuhakepitoisuus = \frac{\text{Käytetyn puuhakkeen massa}}{\text{Valmistetun levyn kokonaismassa}} * 100\% \quad (2)$$

5.1.2 Valmistus pienemmällä hakkeella

Pienemmän hakkeen testimateriaali valmistettiin luvussa 5.1.1 kuvatun menetelmän mukaan, mutta suurempikokoisen haapahakkeen tilalla sama tilavuus pienempikokoista haapahaketta.

5.1.3 Palosuojatun komposiitin valmistus

Palosuojatun testimateriaalin valmistuksessa alumiinimuotti käsiteltiin ja täytettiin haapahakkeella kuten luvussa 5.1.1. Hartsiseos valmistettiin punnitsemalla hartsia, johon sekoitettiin lasijauhetta. Seokseen lisättiin alumiiniitrihydroksidia ja sekoitettiin lastalla kaksi minuuttia. Lopuksi seokseen lisättiin metyylietyyliketoniperoksidi - kovetetta ja sekoitettiin minuutin ajan. Seosta ei tasaannutettu, vaan sen pumppaus muottiin aloitettiin välittömästi, kun kovete oli sekoitettu.

5.1.4 Valmistus vakumoidulla muotilla

Luvun 5.1.1 mukaisessa valmistusmenetelmässä muotiin pääsee ilmaa hartsin mukana ja ilmaa on myös valmiiksi muotin sisällä. Ilman läsnäolo komposiitissa aiheuttaa sen huokoisuutta, mikä voi heikentää komposiitin ominaisuuksia. Ilman vähentämiseksi alkuperäistä reseptiä muutettiin sekä esteriseoksen valmistuksen että muotin täytön osalta. Vähemmän huokoisen materiaalin valmistustapa on esitetty alla.

Alkuperäisen valmistustavan mukaisesti alumiinimuotti täytettiin suurempikokoisella haapahakkeella ja muotti suljettiin. Hartsiseos valmistettiin punnitsemalla hartsi, johon lisättiin lasijauhetta. Lasijauhe sekoitettiin esteriseoksen sekaan lastalla kahden minuutin ajan. Tämän jälkeen seoksen annettiin olla avoimessa astiassa

paikallaan 45 minuuttia. Lopuksi lisättiin metyylietyyliketoniperoksidi -kovetetta ja sekoitettiin lastalla minuutin ajan. Seoksen annettiin seistä avoimessa tilassa kolme minuuttia ennen injektointia.

Hartsiseoksen valmistuksen aikana haapahakkeella täytetty ja suljettu alumiinimuotti täytettiin injektioreiän kautta hartsilla. Kun muotti oli täynnä hartsia, injektioireikä suljettiin täyttöpuolelta. Seuraavaksi poistoreiän kautta imettiin muotista ilmaa 0,5 bar alipaineella VP425 Dual Stage Composite Vacuum Pump -alipainepumpun avulla 15 minuuttia. Vakumoinnin jälkeen injektioletku avattiin ja muottiin injektoitiin hartsiseos.

5.2 Taivutuslujuuden testaus

Testimateriaalit valmistettiin kuten kuvattu luvussa 5.1. Näytteet sahattiin tasosirkkelillä $6.5 \pm 0,5$ mm paksusta levystä dimensioihin 50 ± 1 mm x 170 mm. Taivutuskoe suoritettiin standardin SFS-EN 310 mukaan seuraavilla muutoksilla. Näytteitä ei tasaannutettu 14 vuorokautta vakioidussa ilmastossa, vaan näytteet pidettiin vakioimattomissa olosuhteissa. Lisäksi näytteitä ei kokeen aikana painettu standardin mukaisella 30 mm leveällä painimella, vaan kapeammalla 20 mm painimella. (SFS-EN 310, 1993)

Taivutuskoe suoritettiin aineenkoetuskoneella Zwick Material Prüfung 1475, johon oli kiinnitetty 20 kN paineanturi. Kaikki taivutuskokeet testattiin lämpötilassa 20 °C ja ilman suhteellisessa kosteudessa 60 %.

Kaikki testit suoritettiin tasaisella taivutusnopeudella 3 mm/min. Mittavälin pituus oli 120 mm. Testeissä mitattiin näytteen taipuma ja taivuttamiseen kulunut voima. Kuvassa 9 on aineenkoetuskone valmiina taivutuslujuustestiin.



Kuva 9. Aineenkoetuskone valmiina taivutuslujuustestiin.

Taivutuslujuus testissä määritettiin kunkin levyn kimmokerroin, joka kuvaa materiaalin elastisia ominaisuuksia. Kimmokerroin voidaan määrittää yhtälöllä 3 voima-venymä -käyrän lineaariselta osalta, jossa E on kimmokerroin, σ on jännitys ja ε venymä. Eli, jos materiaaliin kimmokerroin on korkea, tarvitaan materiaalin venyttämiseen tai tässä tapauksessa taivuttamiseen suuri jännitys. (Tran, et al., 1993)

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3)$$

5.3 Vetolujuuden testaus

Testimateriaalit valmistettiin kuten luvussa 5.1. Näytteet sahattiin $6,5 \pm 0,5$ mm paksusta levystä tasosirkkelillä 20 mm x 180 mm suorakaiteiksi. Suorakaiteet kavennettiin keskeltä nauhahiomakoneella $10 \pm 0,2$ mm paksuuteen. Kappaleen valmistuksessa mukailtiin standardin ISO 527-4 vetokappaletta 1B (SFS-EN ISO 527-4,

1997). Kappaleissa mittavälin pituus oli 60 mm ja pyöristyksen säde R oli 9 mm. Kuvassa 10 on esitettyä kaksi esimerkkikappaletta.



Kuva 10. Esimerkki vetolujuuskappaleista.

Kappaleiden dimensioiden tarkkuus täytti ISO 527-4 standardin vaatimukset kappaletyypille 1B paitsi pyöristyksen säteen R osalta (SFS-EN ISO 527-4, 1997). Kavennetulta osuudelta kappaleen reuna jäi tasaiseksi eikä haapapartikkeleita irronnut matriisista. Kuvassa 11 on esitettyä lähikuva hiontajäljestä.



Kuva 11. Vetokappaleiden kavennuksen hiontajälki.

Vetokokeet suoritettiin aineenkoetuskoneella Zwick Material Prüfung 1475, 20 kN paineanturilla. Kokeet suoritettiin 20 °C lämpötilassa ja ilman suhteellisessa kosteudessa 60 %. Näytteet kiinnitettiin molemmista päistä aineenkoetuskoneeseen ruuvipenkeillä. Ruuvipenkkien kiristys tehtiin momenttiavaimella aina samaan kireyteen. Ruuvipenkkien välin pituus oli 85 mm. Näytteitä venytettiin tasaisella

nopeudella 2 mm/min, kunnes näyte murtui. Venytyksen aikana kappaleista mitattiin niiden venymiseen ja murtumiseen kuluva voima sekä kappaleiden venymä. Kuvassa 12 aineenkoetuskone on valmiina vetolujuustestiin.

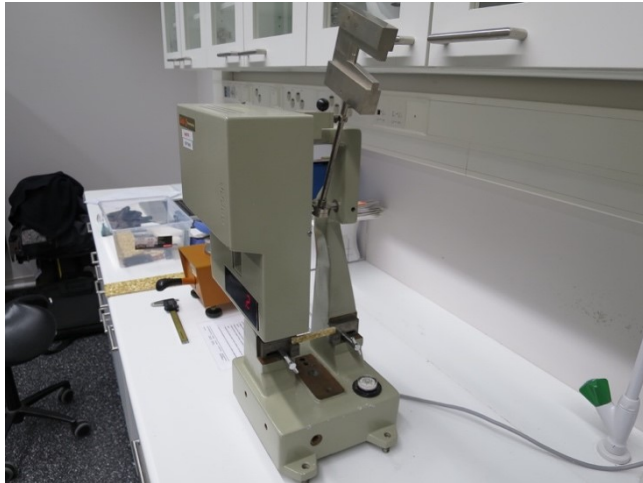


Kuva 12. Aineenkoetuskone valmiina vetolujuustestiin.

5.4 Iskulujuuden testaus

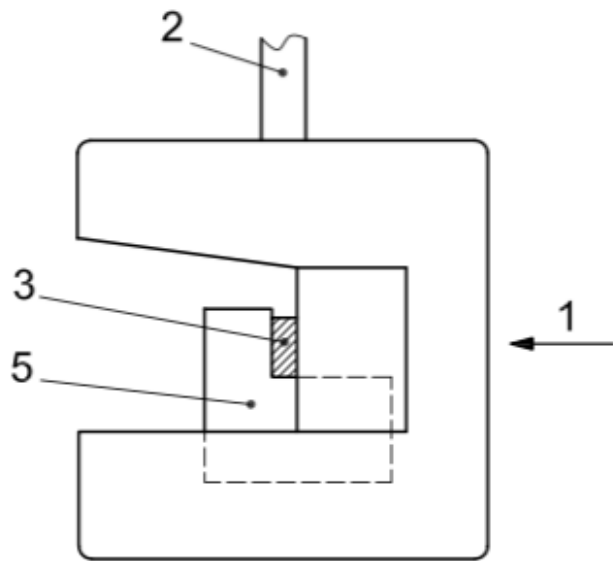
Testimateriaalit valmistettiin kuten kuvattu luvussa 5.1. Näytteet sahattiin tasosirkkelillä $6,5 \pm 0,5$ mm paksusta levystä dimensioihin $10 \pm 0,2$ mm x 80 ± 2 mm. Iskulujuustestit suoritettiin standardin SFS-EN ISO 179-1 mukaisesti seuraavilla muutoksilla: näytteitä ei tasaannutettu 16 tuntia vakioidussa ilmastossa, vaan ne olivat vakioimattomissa olosuhteissa ennen testausta. (SFS-EN ISO 179-1, 2010)

Kokeet suoritettiin iskulujuuslaitteella Zwick Material prüfung D-7900 lämpötilassa 23 °C ja ilman suhteellisessa kosteudessa 50 %. Kokeessa käytettiin 5 J heiluria, joka vapautettiin 160 ° kulmasta. Kuvassa 13 on esitettynä iskulujuuslaite valmiina iskulujuustestiin.



Kuva 13. Iskulujuuslaite valmiina iskulujuustestiin.

Kappaleet olivat asetettu vaakatasoon ja tuettu molemmista päistä. Tukien välinen etäisyys oli 62,5 mm. Kappaleita ei lovitettu. Heiluri iskeytyi kohtisuoraan testikappaleiden pintaa vastaan. Kuvassa 14 on esitettynä iskulujuustestin detaljikuva. Kuvan 14 numero 1 viittaa iskun suuntaan, numero 2 heilurin varteen, numero 3 testikappaleeseen ja numero 5 tukeen.



Kuva 14. Iskulujuustestin detaljikuva (SFS-EN ISO 179-1, 2010).

Iskulujuus laskettiin jakamalla koekappaleen murtamiseen kulunut voima kappaleen poikkipinta-alalla.

6 Tulokset ja tulosten tarkastelu

Alaluvussa 6.1 käsitellään testimateriaalien valmistuksen aikana ilmenneet havainnot, alaluvussa 6.2 taivutuskokeiden tulokset, alaluvussa 6.3 vetokokeiden tulokset ja lopuksi iskulujuuskokeiden tulokset alaluvussa 6.4.

6.1 Valmistusmenetelmien toimivuus

Kaikilla luvussa 5.1 kuvatuilla menetelmillä saatiin valmistettua yhtenäisiä koossa pysyviä komposiittilevyjä. Niissä kuitenkin ilmeni alla luoteltuja epätasaisuuksia koon ja rakenteen suhteen. Kuvissa 15–18 näkyy alkuperäisen reseptillä tehty komposiittilevy, pienellä hakkeella valmistettu levy, vakumoidulla muotilla valmistettu levy ja palosuojattu levy.



Kuva 15. Alkuperäisellä reseptillä valmistettu komposiittilevy.



Kuva 16. Pienellä hakkeella valmistettu komposiittilevy.



Kuva 17. Vakumoidulla muotilla valmistettu komposiittilevy.

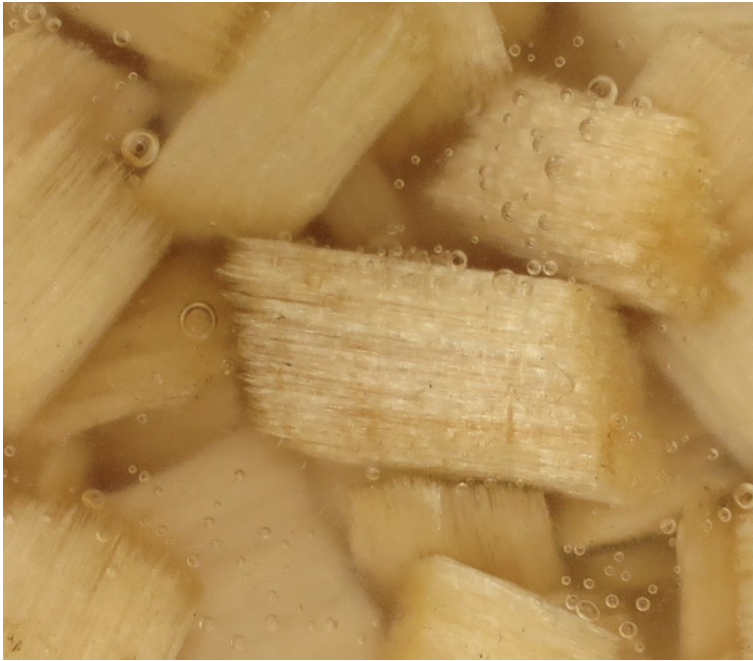


Kuva 18. Palosuojattu komposiittilevy.

6.1.1 Komposiittilevyjen koon ja rakenteiden vaihtelu

Kun alumiinimuotti suljettiin hakkeen lisäämisen jälkeen, muotin kansi taipui lähes 1 mm horisontaalisessa suunnassa. Vertikaalisuunnassa taipuma oli alle 0,1 mm. Valmistetuissa komposiittilevyissä ei kuitenkaan havaittu taipumaa, mutta niiden paksuus vaihteli välillä 6,0–6,9 mm. Muotin kannen taipuminen ilmeni siten komposiittilevyjen paksuusvaihteluna.

Hartsiseoksen sekoitusvaiheissa seokseen päätyi pieniä ilmakuplia. Kuplat vähenivät tasaannutusvaiheessa, mutta seokseen silti jäi ilmaa. Komposiittilevyissä seoksen ilmakuplat ilmenevät tyhjinä huokosina (Kuva 19).



Kuva 19. Komposiittilevy sisältää tyhjiä ilmataskuja.

Pienemmällä hakkeella tehdyssä levyissä oli ilmakuplien aiheuttamia huokosia vähemmän ja vakumoidulla muotilla tuotetuissa levyissä ei juuri yhtään (Kuva 20).



Kuva 20. Lähikuva vakumoidulla muotilla tuotetusta levystä.

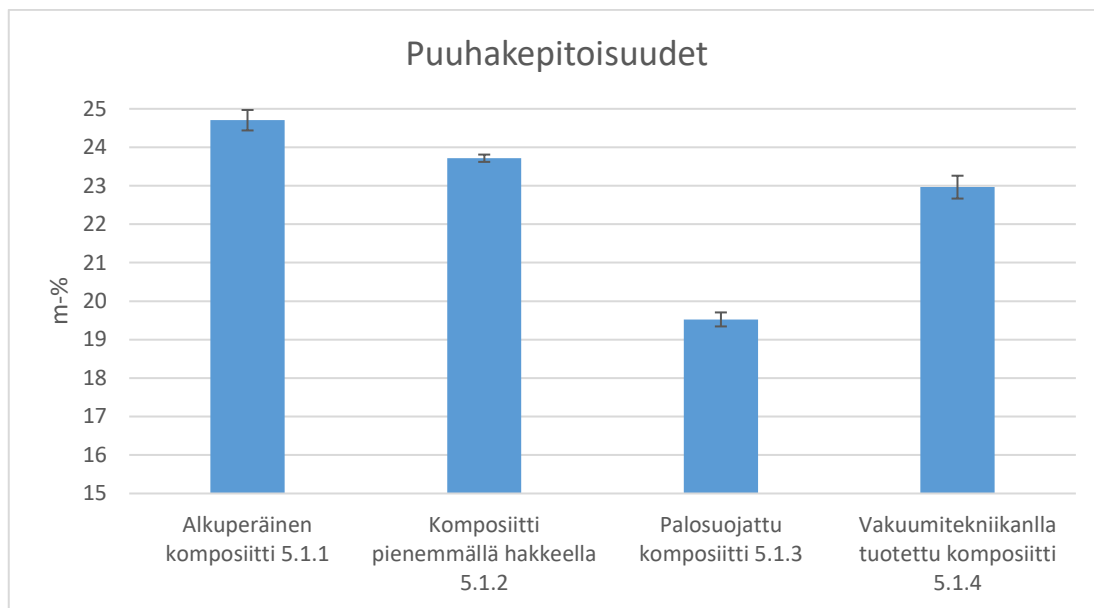
Kaikki levyjen valmistusvaiheen sekoitukset suoritettiin käsin minkä vuoksi raaka-aineiden sekoittuminen ei ollut täydellistä. Tämä ilmeni erityisesti alumiinitrihydroksidin kasaumina palosuojaetuissa levyissä (Kuva 21).



Kuva 21. Vaalea alumiinitrihydroksidi -kasauma.

6.1.2 Komposiittilevyjen puuhakeisuus

Testimateriaalien puuhakeosuudet ovat esitettynä kuvassa 22. Kuvan palkit kuvaavat eri valmistustavoilla tuotettujen rinnakkaislevyjen hakepitoisuuksien keskiarvoja ja palkkien yläpäässä olevat välit kuvaavat rinnakkaislevyjen hakepitoisuuksien keskihajontaa. Alkuperäisellä valmistustavalla komposiittilevyjä valmistettiin neljä ja kullakin muulla tavalla kaksi.

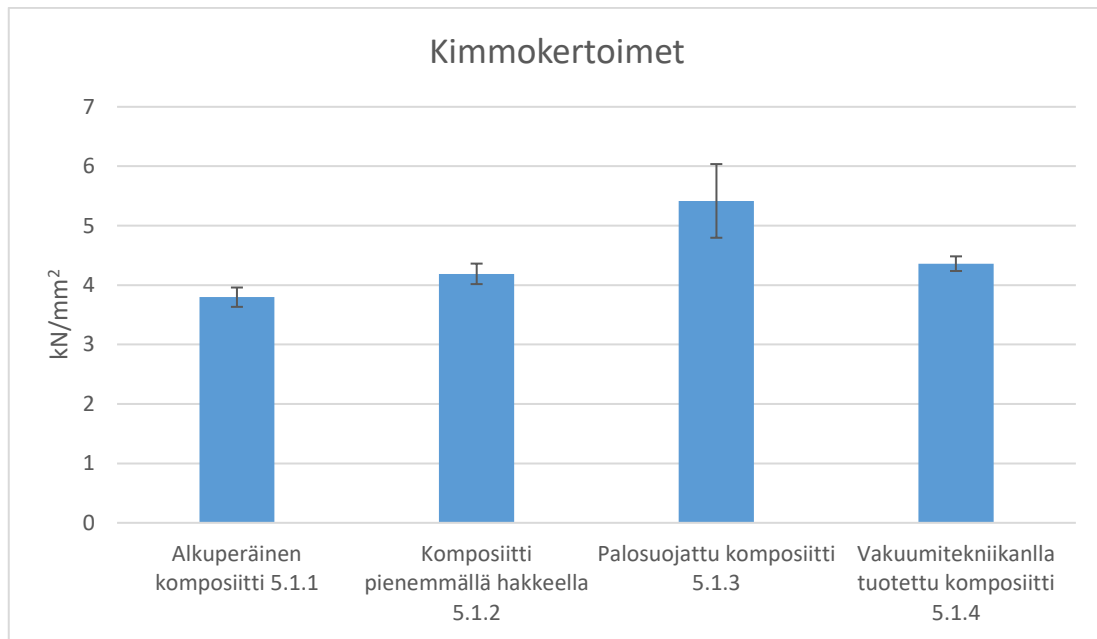


Kuva 22. Puukomposiittilevyjen puuhakepitoisuudet.

Kuvasta 22 nähdään, että hakepitoisuuksien hajonta rinnakkaislevyjen välillä on erittäin pientä. Valmistustavat ovat siis hakepitoisuuden suhteen toistettavia. Palosuojatun levyn hakepitoisuus on selvästi muita alempi. Se on täysin ymmärrettävää, koska valmistuksessa seokseen lisättiin huomattava määrä ATH:ta, joka tuo levyyn merkittävästi lisää massaa. Tällöin hakkeen suhteellinen osuus pienenee, vaikka haketta onkin levyssä massana sama määrä kuin muissakin levyissä. Pienemmällä hakkeella tehdyt levyt sekä vakumoidulla muotilla tehdyt levyt sisälsivät suhteellisesti hieman vähemmän haketta kuin alkuperäisellä valmistustavalla tehdyt. Näillä valmistustavoilla tehdyt levyt sisälsivät vähemmän huokosia, mikä selittää hakkeen pienempää osuutta. Vakuumilevyissä hartsia on todennäköisesti myös imeytynyt hakkeeseen, mikä osaltaan vähentää hakkeen suhteellista osuutta.

6.2 Taivutuslujuus

Taivutuslujuuskokeiden perusteella määritetyt levyjen kimmokertoimet ovat esitettyinä kuvassa 23. Pylväät kuvaavat rinnakkaisista taivutuskokeista laskettujen kimmokertoimien keskiarvoja. Jokainen keskiarvo koostuu kuudesta mittauksesta. Pylväiden päässä olevat välit kuvaavat mittaustulosten keskihajontaa.



Kuva 23. Määritetyt kimmokertoimet.

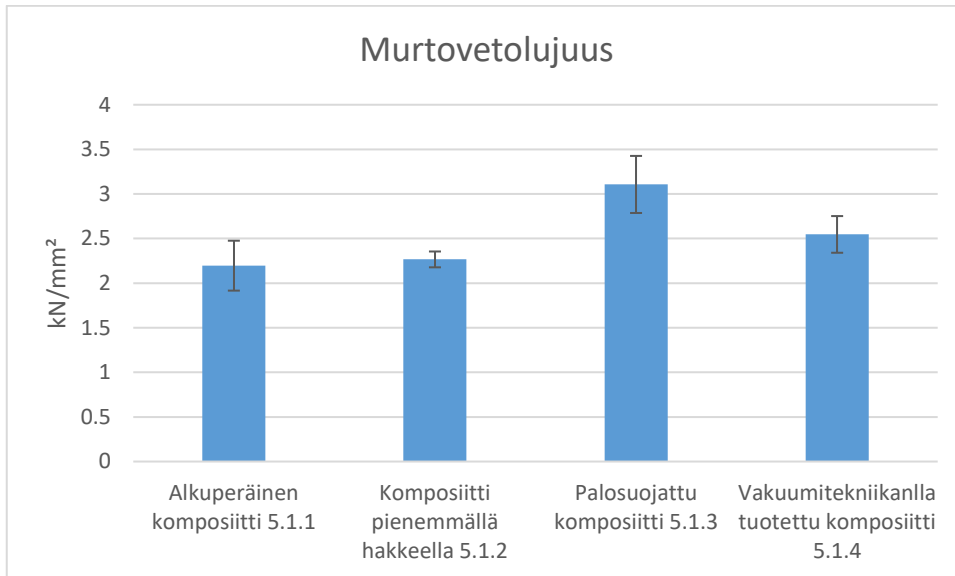
Kappaleet murtuivat keskeltä kappaletta ja murtumiset tapahtuivat standardin SFS-EN 310 mukaisesti 30-60 sekunnin kuluessa taivutuksen aloittamisesta (SFS-EN 310, 1993). Palosuojattujen levyjen keskimääräinen kimmokerroin oli korkein. Muiden valmistusmenetelmien väliset erot olivat pieniä. Pienemmällä hakkeella tehtyjen levyjen sekä vakumoidulla muotilla tehtyjen levyjen kimmokertoimet olivat hieman korkeammat kuin alkuperäisellä valmistustavalla valmistettujen levyjen. Tätä voi selittää näiden levyjen alhaisempi huokosten määrä.

Palosuojattujen levyjen kimmokertoimien välillä oli selvästi enemmän hajontaa kuin muiden levyjen. Tätä selittää ATH:n epätasainen sekoittuminen materiaaliin. Muiden levyjen kimmokertoimien hajonta oli varsin pientä ja pienintä vakuumilevyillä.

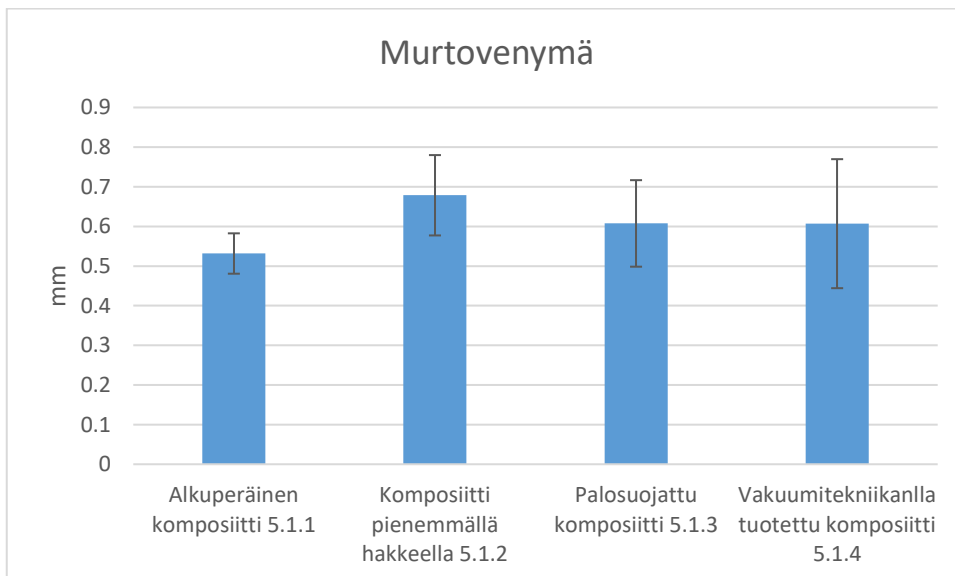
6.3 Vetolujuus

Vetolujuuskokeiden tulokset ovat koottu kuviin 24 ja 25. Kuvassa 24 on esitettyä koekappaleiden maksimaaliset murtovetolujuudet ennen murtumista ja kuvassa 25 koekappaleiden murtovenymä. Kuvaajien pylväät kuvaavat mittaustulosten keskiarvoja ja pylväiden päissä olevat välit mittausten keskihajontaa. Molempien

kuvaajien keskiarvot ja keskihajonnat koostuvat kahdeksasta rinnakkaisesta mittauksesta.



Kuva 24. Murtovetolujuustulokset.



Kuva 25. Murtovenymätulokset.

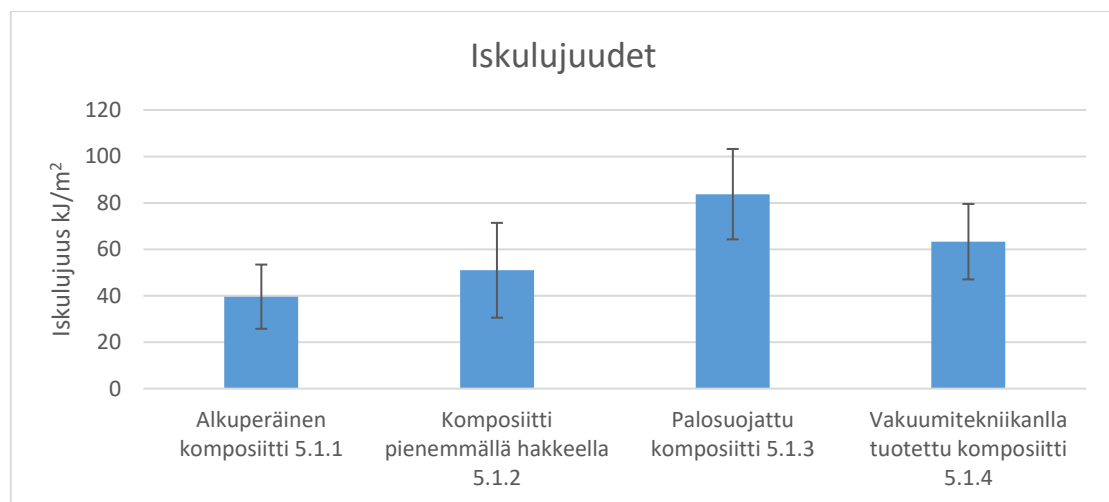
Kaikki kappaleet murtuivat mittaväliltä ja kappaleiden kiinnityksessä ei havaittu luistamista, joten testejä voi pitää onnistuneina. Kuvasta 24 nähdään, että korkein murtovetolujuus saavutettiin palosuojatuilla levyillä ja seuraavaksi korkein vakuumilevyillä. Tulokset ovat linjassa luvussa 6.2 käsiteltyjen taivutuslujuustulosten

kanssa. Tulosten keskihajonnat ovat alkuperäisellä valmistustavalla valmistettujen levyjen sekä palosuojattujen levyjen murtovetolujuuden hajonnat olivat suuremmat kuin muiden levyjen. Ero johtui todennäköisesti siitä, että nämä levyt olivat koostumukseltaan heterogeenisiä.

Kuvassa 25 esitetyistä tuloksista nähdään, että kaikkien levyjen murtovenymä oli pieni. Nämä komposiitit ovat siis hauraita ja murtuvat lähes heti venytettäessä. Kaikkien levyjen murtovenymien keskihajonnat ovat suuremmat kuin murtovetolujuuden.

6.4 Iskulujuus

Iskulujuustulokset ovat esitettynä kuvassa 26. Kuvan pylväät kuvaavat 13 iskulujuuskokeen keskiarvoa ja pylvään päässä olevat välit kokeiden keskihajontaa.



Kuva 26. Iskulujuustulokset.

Kuten kuvassa 26 näkyy, iskulujuustulosten keskimääräinen hajonta on suurta. Suuri hajonta aiheutui levyjen heterogeenisyydestä ja koekappaleiden pienestä koosta. Levyissä lujitetta ei ole järjestetty ja ne sisälsivät epätasaisesti ilmakuplia, lasipartikkeleita ja ATH:ta. On sattumanvaraista, kuinka monta lujitepalaa ja kuinka monta ilmakuplaa tai lasijauhepartikkeliä osuu kokeessa heilurin kohdalle. Osa koekappaleista ei myöskään kokeessa hajonnut heilurin kohdalta, vaan hieman sen

vierestä. Tällöin heilurin kohdalle on sattunut levyn poikkeuksellisen luja kohta, jolloin koekappale hajoaa muualta, vaikka suurin voima tulee kappaleen keskelle.

Iskulujuusarvojen hajonta on moninkertaisesti suurempaa, kuin luvussa 6.2 käsiteltyjen taivutuslujuuskokeiden ja luvussa 6.3 käsiteltyjen vetolujuuskokeiden. Ero on selitettävissä osin näytekappaleiden koon ja osin kokeen luonteen perusteella. Iskulujuuskokeiden koekappaleet olivat varsin pieniä, jolloin heterogeenisyyden vaikutus korostuu. Lisäksi murtolujuuden kuvatessa murtuman etenemistä, on jännityksen keskittäjien ja epäjatkuvuuskohtien merkitys suurta kuten todettiin luvussa 3.3.

7 Johtopäätökset

Tämän diplomityön tavoitteena oli kartoittaa Woodion puu-muovikomposiitin lujuusominaisuuksia sekä parantaa komposiitin rakenteen tasaisuutta ja hyödynnettävyyttä erilaisiin sovelluksiin. Lujuusominaisuuksia selvitettiin taivutus-, isku-, ja vetolujuuskokeilla. Suoritettujen lujuuskokeiden onnistumista voidaan pitää hyvänä. Tämä arvio perustuu mittaustulosten pieneen hajontaan erityisesti veto- ja taivutuslujuuskokeiden osalta. Voidaan katsoa, että komposiittia pystyttiin valmistamaan ja testaamaan toistettavasti. Iskulujuuskokeissa tulosten hajonta oli suurempaa mikä johtuu kokeen ja testattavan ominaisuuden luonteesta. Iskulujuuskokeen standardi esimerkiksi vaatii kokeessa käytettäväksi enemmän testattavia rinnakkaiskappaleita kuin veto- ja taivutuskokeissa vaaditaan (SFS-EN ISO 179-1, 2010; SFS-EN 310, 1993; SFS-EN ISO 527-4, 1997)

Suoritetuissa kokeissa oli lieviä poikkeamia standardin mukaisiin kokeisiin. Poikkeamat ovat tuskin kuitenkaan oleellisesti vaikuttaneet tuloksiin, joten tuloksia voi verrata muihin näiden standardien mukaan tehtyjen tutkimusten tuloksiin.

Komposiitin rakenteen tasaisuutta onnistuttiin parantamaan käyttämällä pienempää lujitteen partikkelikokoa sekä hyödyntämällä vakuumia valmistuksessa. Silmämääräisesti parempi tasaisuus näkyi komposiittilevyissä ilmakuplien muodostamien onttojen huokosten pienempänä määränä. Lajuustuloksissa huokosten vähentyminen näkyi korkeampana kimmokertoimena ja murtolujuutena. Myös iskulujuuskokeiden tulosten keskiarvot olivat korkeammat alkuperäiseen reseptiin nähden, mutta tulosten keskihajonnat leikkaavat toisiaan, joten eroa iskulujuudessa ei voi pitää yhtä selkeänä. Huokosten vähäisyys on myös esteettisesti merkittävä etu. Tosin pienemmän hakekoon hyödyntäminen muuttaa ulkonäköä alkuperäiseen reseptiin verrattuna niin paljon, ettei materiaalien ulkonäköä voida enää suoraan verrata.

Komposiitin soveltuvuutta muihin käyttökohteisiin kuin käsienpesualtaisiin parannettiin lisäämällä komposiittiin ATH:ta. Luvussa 3.4 todettiin, että puu-muovikomposiitti on herkästi palavaa, mikä rajoittaa myös Woodion komposiitin hyödyntämistä esimerkiksi asuinrakennusten seinien verhoilumateriaalina. ATH toimii komposiitissa palonestoaineena, joka on yksi mahdollinen keino parantaa komposiitin paloluokkaa. Vastoin odotuksia, ATH:n lisääminen kasvatti komposiitin lujuusominaisuuksia kaikkien lujuuskokeiden perusteella. Kirjallisuudesta löytyy ristiriitaista tietoa ATH:n vaikutuksesta lujuusominaisuuksiin.

Sliwa et al.:in tutkimuksessa epoksin kimmokerroin, iskulujuus ja vetolujuus kasvoivat, kun epoksiin lisättiin ATH:ta ja bentoniittia (Sliwa, et al., 2015). Toisaalta toisessa tutkimuksessa polypropeenin vetolujuus, taivutusvetolujuus ja murtuman etenemisen vastustuskyky heikentyivät suhteessa lisätyn ATH:n määrään (Shah, et al., 2014).

Visuaalisessa tarkastelussa ATH:n lisääminen heikensi rakenteen tasaisuutta, mikä näkyi myös lujuustulosten suurempana hajontana. ATH:sta aiheutui myös vaaleaa esteettistä virhettä komposiittilevyissä. Rakenteen epätasaisuus voidaan saada korjattua kehittämällä valmistusprosessia. Esimerkiksi luvussa 5.1 kuvatussa valmistustavassa ei ole tehokasta sekoitusta, jota käytettäisiin teollisen mittakaavan valmistuksessa. Silti voidaan todeta ATH:n lisäämisen heikentävän prosessoitavuutta.

Palonestoaineena ATH heikentää materiaalin palo-ominaisuuksia ja täten myös vaarantaa komposiitin kelpoisuuden energiajätteeksi. Mikäli energiajättekelpoisuus menetetään ei materiaalille ole tiedossa ekologista loppukäyttökohdetta. Woodion kehittämä valmistusprosessi olisi silti edelleen erityisesti energian kulutuksen kannalta huomattavasti ekologisempi kuin keraamien.

Tämä diplomityö tarjoaa tavanomaiset lujuustiedot Woodion komposiitista ja pohtii muutamaa menetelmää, jolla komposiittia voisi kehittää. Tämän diplomityön ulkopuolelle jää kiinnostavia tutkimusaiheita vielä runsaasti. Vakuumin hyödyntäminen valmistuksessa tuotti pelkästään positiivisia vaikutuksia sekä

lujuuteen että materiaalin ulkonäköön. Vakuumin hyödyntämisen osalta on järkevää tutkia menetelmän implementoimista tuotantoon. Tässä diplomityössä vakuuminmenetelmään oli yhdistetty puuhakkeen esikostutus hartsilla. Esikostutuksen ja vakuumin vaikutuksia huokoisuuden vähenemiseen kannattaa tutkia myös erikseen.

Tämän tutkimuksen kaikissa komposiiteissa käytettiin sidosaineena polyesteriä. Vaikka polyesteri on käytetyin ja halvin polymeeriharts, se ei välttämättä ole optimaalisin tuotteelle (Callister & Rethwisch, 2015). Esimerkiksi epoksien kutistumat ovat pääasiassa pienempiä kuin polyestereiden (Chawla, 1987). Tällä hetkellä tuotteita valmistetaan muoteilla ja kutistuma aiheuttaa tuotteisiin jännityksiä, jotka voivat pahimmassa tapauksessa aiheuttaa halkeaman tuotteeseen.

Kuten jo todettiin aikaisemmin ATH:n lisääminen aiheutti epätasaisuutta komposiitin rakenteeseen. On mahdollista, että ongelma olisi tuotantomittakaavassa lievempi tai olematon tehokkaammalla sekoituksella ja pumpulla, mutta asiaa ei tässä diplomityössä tutkittu. Lisäksi palosuojaamisesta on tutkittava tarvittava ATH:n määrä, jolla päästäisiin haluttuun paloluokkaan. Lisäksi ATH laatuja löytyy useita, jotka voivat vaikuttaa tuotteen ulkonäköön eri tavoin. Ulkonäkövaikutusten minimoimisen kannalta olisi siis hyödyllistä tutkia eri ATH laatuja.

Woodio Oy:n komposiitin nykyisen sovelluksen, eli käsienvaivaltaan, lujuusvaatimukset eivät ole erityisen korkeat. Enemmän painoarvoa on esimerkiksi sen esteettisyydellä, ekologisuudella ja kemiallisella kestävyydellä. Mikäli komposiittia halutaan kuitenkin käyttää myös muissa sovelluksissa, voi lujuuden kasvattaminen olla välttämätöntä. Esimerkiksi WC-istuimien pitää standardin SFS-EN 997 mukaan kestää 400 kg staattista kuormaa standardin mukaisessa raskuuskokeessa (SFS-EN 997, 2018). Mikäli lujuutta jouduttaisiin nostamaan paljon, voi olla järkevää tutkia lujitteen dimensioiden muuttamista sekä mahdollisuuksia orientoida lujitetta tiettyyn suuntaan. Kuitumaisilla lujitekappaleilla, jotka ovat pitkiä ja kapeita, saavutetaan tavallisesti korkeampi lujuus (Agarwal, 1990; Bunsell & Renard, 2005;

Callister & Rethwisch, 2015). Orientaation kannalta parhaaseen lujuustulokseen päästään, kun kuitu on suunnattu yhdensuuntaisesti kappaleeseen kohdistuvan voiman kanssa (Pickering, et al., 2016). Nykyisessä komposiitissa lujite on muodoltaan lastumainen partikkeli eikä kuitu ja partikkelien orientaatio on sattumanvarainen.

Tässä diplomityössä onnistuttiin määrittämään Woodion komposiitille kimmokerroin, murtovetolujuus, murtovenymä ja iskulujuus. Komposiitin rakenteesta kehitettiin tasaisempi hyödyntämällä pienempää lujitteen partikkelikokoa sekä vakuumia valmistusvaiheessa. Lisäksi selvitettiin, että ATH:n lisääminen komposiittiin kasvattaa komposiitin kimmokerrointa, murtovetolujuutta ja iskulujuutta.

8 Lainatut lähteet

Agarwal, B. D., 1990. Fracture Toughness of Fiber-reinforced Composites. Teoksessa: *Handbook of Ceramics and Composites Volume 1: Synthesis and Properties*. New York: Marcel Dekker inc., pp. 269-305.

Ashori, A., 2008. Wood-plastic composites as promising green-composites for automotive industries!. *Bioresource Technology*, 99, pp. 4661-4667.

Begum, K. & Islam, M., 2013. Natural Fiber as a substitute to Synthetic Fiber in Polymer Composites. *Research Journal of Engineering Sciences*, 4, Issue 2, pp. 46-53.

Bunsell, A. R. & Renard, J., 2005. *Fundamentals Of Fibre Reinforced Composite Materials*. Lontoo: Institute of Physics Publishing.

Cai, Z. & Ross, R. J., 2010. Mechanical properties of Wood-Based Composite Materials. Teoksessa: *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*. Wisconsin: Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, pp. 12-2-12-10.

Callister, W. D. & Rethwisch, D. G., 2015. *Materials science and engineering an introduction*. Yhdeksäs painos toim. Hoboken: John Wiley & Sons inc.

Chawla, K., 1987. *COMPOSITE MATERIALS Science and Engineering*. Toinen painos toim. New York: Springer-Verlag.

Chen, J. ym., 2014. Surface modification and characterization of aramid fibers with hybrid coating. *Applied Surface Science*, Issue 321, pp. 103-108.

Chung, D., 1994. *Carbon fiber composites*. Boston: Butterworth-Heinemann Cop..

Cronhjort, Y. ym., 2016. *Funktional Wood*. Helsinki: Unigrafia Oy.

Csanady, E. & Magoss, E., 2013. *Mechanicks of Wood Machining*. Toinen painos toim. Berliini: Springer-Verlag.

Douglas, D. S., Quingling, W. & Guangping, H., 2014. *Introduction to Wood and Natural Fiber Composites*. Chichester: John Wiley & Sons.

Duquesne, S. ym., 2013. Study of the thermal degradation of an aluminium phosphinate-aluminium trihydrate combination. *Thermochimica Acta*, Issue 551, pp. 175-183.

Francois, D., Pineau, A. & Zaoui, A., 2013. *Mechanical Behaviour of Materials Volume II: Fracture Mechanics and Damage*. Toinen painos toim. Dordrecht: Springer Science, Business Media.

Gamstedt, E. K. & Sjögren, B. A., 1999. Micromechanisms in tension-compression fatigue of composite laminates containing transverse plies. *Composites Science and Technology*, Issue 59, pp. 167-178.

Garcia, J. M., Garia, F. C., Serna, F. & Pena, J. L., 2010. High-performance aromatic polyamides. *Progress in Polymer Science* , Issue 35, pp. 623-686.

Gardner, D. J., Han, Y. & Wang, L., 2015. Wood-Plastic Composite technology. *Current Forestry Reports*, Issue 1, pp. 139-150.

Gay, D. & Hoa, S. V., 2007. *Composite Materials Design And Applications*. Toinen painos toim. Lontoo: Taylor & Francis Group.

Hughes, M. & Hill, C., 2010. Natural Fibre Reinforced Composites Opportunities and Challenges. *Journail of Biobased Materials and Bioenergy*, Issue 4, pp. 148-158.

Hull, T. R., Witkowski, A. & Hollingbery, L., 2011. Fire retardant action of mineral fillers. *Polymer Degradation and Stability*, Issue 96, pp. 1462-1469.

Jaglarz, A., 2015. Sustainable development in the concepts of modern bathrooms. *Procedia Manufacturing*, Issue 3, pp. 1638-1645.

Kaushik, P. & Jin, K. K., 2010. *Recent Advances in the Processing of Wood-Plastic Composites*. Berliini: Springer-Verlag.

Liu, T., Zheng, Y. & Jie, H., 2010. Surface modification of aramid fibers with new chemical method for Improving interfacial bonding strength with epoxy resin. *Journal of Applied Polymer Science*, Issue 118, pp. 2541-2552.

Marcovich, N., Reboredo, M. & Aranguren, M., 1998. Mechanical Properties of Woodflour Unsaturated Polyester Composites. *Journal of Applied Polymer Science*, Issue 70, pp. 2121-2131.

Mazumbar, S. K., 2002. *Composites Manufacturing Materials, Product and Process Engineering*. Boca Raton: CRC Press LLC.

Medina, C., Sanchez se Rojas, M. I. & Frias, M., 2012. Reuse of sanitary ceramic wastes as coarse aggregate in eco-efficient concretes. *Cement & Concrete Composites*, Issue 34, pp. 48-56.

Pickering, K. L., Aruan Efendy, M. G. & Le, T. M., 2016. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Issue 83, pp. 98-112.

Pritchard, G., 2004. Two technologies merge: wood plastic composites. *Plastics, Additives and Compounding*, 6, pp. 18-21.

SFS-EN 310, 1993. *PUULEVYT. TAIVUTUSKIMMOMODULIN JA TAIVUTUSLUJUUDEN MÄÄRITYS*, s.l.: Suomen standardoimisliitto.

SFS-EN 997, 2018. *WC pans and WC suites with integral trap*, s.l.: Suomen Standardoimisliitto.

SFS-EN ISO 179-1, 2010. *Plastics. Determination of Charpy impact properties. Part 1 Non instrumented impact test*, s.l.: Suomen standardoimisliitto.

SFS-EN ISO 527-4, 1997. *Plastics. Determination of tensile properties. Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites*, s.l.: Suomen standardoimisliitto.

Shah, A. ym., 2014. Effect of concentration of ATH on mechanical properties of polypropylene/aluminium trihydrate (PP/ATH) composite. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Issue 24, pp. 81-89.

Singh, C. V. & Talreja, R., 2012. *Damage and Failure of Composite Materials*. New York: Cambridge University Press.

Sliwa, R. ym., 2015. Flame resistant hybrid epoxy composites. *Polimery*, Issue 60, pp. 667-670.

Talreja, R., 2015. Analysis of Failure in Composite Structures. Teoksessa: *Failure and Damage analysis of Advanced Materials*. Vienna: Springer, pp. 255-278.

Tran, Q. T., Berke, G. S., Gerratt, B. R. & Kreiman, J., 1993. Measurement of Young's Modulus in The in Vivo Human Vocal Folds. *Annals Of Otology, Rhinology & Laryngology* , Issue 102, pp. 584-591.

Woodio, 2019. *Woodio*. [Online]
Available at: <http://www.woodio.fi>